

Hygienesichere Oberflächen im nicht-immergierten System

Von der

Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina

zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades einer

Doktoringenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Inka Dreßler

geboren am 30.05.1989 in Achim

Eingereicht am: 21. Dezember 2017

Disputation am: 27. Juni 2018

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann

Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl

(2018)

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades
einer Doktoringenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Eingereicht am: 21. Dezember 2017

Disputation am: 27. Juni 2018

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann
Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl

Diese Dissertation ist über die Internetseite der Universitätsbibliothek Braunschweig
online zugänglich.

Zusammenfassung

Hygienesichere Oberflächen im nicht-immergierten System

Im Hinblick auf die Materialwahl in Gesundheitseinrichtungen sind Kenntnisse über deren Hygienesicherheit, d. h. eine gute Reinigbarkeit sowie eine geringe Überlebensdauer von pathogenen Erregern, unerlässlich. Somit kann das von unbelebten Feststoffoberflächen ausgehende Infektionsrisiko minimiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, die hygienebezogenen Eigenschaften einer Feststoffoberfläche in bewert- und vergleichbare Größen zu überführen. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Erarbeitung eines tieferen Verständnisses der Reinigbarkeit von Feststoffoberflächen, der Reinigungsprozesse und -kinetik. Ferner wird die Untersuchung der Überlebensdauer von Krankheitserregern beschrieben.

Zunächst werden auf Grundlage der Theorie der Adhäsionskräfte wesentliche Einflussgrößen abgeleitet und deren Auswirkungen auf die Adhäsionskraft zwischen einzelnen Mikropartikeln und Feststoffoberflächen mithilfe der colloid probe technique gemessen.

Mittels eines speziellen Versuchsaufbaus werden anschließend quantitative Zusammenhänge zwischen den als maßgeblich identifizierten Oberflächeneigenschaften der Feststoffoberfläche (arithmetische Mittenrauheit und freie Oberflächenenergie), den Charakteristika einer partikulären Kontamination und der Restpartikelmenge als Maß der Reinigbarkeit hergestellt. Hierbei werden krankenhausübliche Feststoffoberflächen mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften berücksichtigt; hierzu gehören Edelstähle, Polymere, Beschichtungen, Kupferlegierungen und Emaille. In den eigenen Versuchen kommen Partikelsysteme als Modellkontaminationen zum Einsatz, welche die Größenbereiche der relevanten Kontaminationen in Gesundheitseinrichtungen (i. W. Staub und Mikroorganismen) abbilden. Ferner werden kontaminationsbezogene Einflüsse und verschiedene Prozessparameter auf das Reinigungsergebnis identifiziert und diskutiert. Auf Basis der Adhäsionsversuche mit Einzelpartikeln sowie der Reinigungsversuche mit Partikelkollektiven wird ein Modell entwickelt, welches die Reinigung von Feststoffoberflächen mit dem Scheuer-Wisch-Verfahren beschreibt.

Weiterhin wird die Überlebensdauer von relevanten Erregern (*S. aureus*, *A. baumannii*, *C. albicans* und *Ps. aeruginosa*) auf verschiedenen Materialien und in Abhängigkeit von den Oberflächeneigenschaften unter praxisnahen Randbedingungen untersucht.

Auf Grundlage der erlangten Erkenntnisse werden praxisgerechte Empfehlungen zur Materialwahl, Oberflächengestaltung sowie zur Handhabung von Reinigungsprozessen gegeben.

Summary

Hygienically Safe Surfaces in non-immersed Systems

The knowledge of a hygienically safe – meaning good cleanability and short duration of survival of pathogenic germs - choice of material in healthcare facilities is a prerequisite. As a consequence the risk of infection from surfaces may be minimized.

Therefore, the aim of the present work is to make the property “hygienic safety” comparable and assessable. The main focuses lie on developing an improved understanding of the cleanability of surfaces, cleaning processes as well as kinetics. Moreover, the duration of survival of pathogenic germs on different surfaces are specified.

First and foremost, essential influential variables are distilled from the theory of adhesion. Subsequently, their impact on adhesion between single microparticles and surfaces is studied with the aid of colloid probe technique.

By the use of a suitable experimental assembly a quantitative connectivity between the relevant surface properties (mean roughness and surface free energy), the characteristics of a particulate contamination and the particulate residue after cleaning used as measure for cleanability is set. For this purpose, typical hospital surfaces such as stainless steel, polymers, coatings, copper alloys and enamel are utilized. Particle systems, which are comparable in size with regular contaminations in healthcare facilities (e. g. dust or microorganisms), are used. Moreover, the influence of contamination and different process parameters on the cleaning result are identified and discussed. Based on adhesion measurements with single particles as well as the cleaning experiments with particulate systems a model to describe the cleaning of surfaces is developed.

Beyond the duration of survival of relevant pathogenic germs (*S. aureus*, *A. baumannii*, *C. albicans* and *Ps. aeruginosa*) on different materials dependent on their surface characteristics under practical relevant circumstances is examined.

On the basis of the empirical findings practical relevant recommendations are given. These concern the choice of material, surface design as well as the handling of cleaning processes.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig. Die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit verdanke ich außergewöhnlichen Menschen, die in vielfältiger Weise zu deren Gelingen beigetragen haben:

Ermöglicht und betreut wurde die Arbeit von Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann, dem ich für das entgegengebrachte Vertrauen und die gewährten Freiheiten danken möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl danke ich besonders für die Übernahme des Koreferats und den damit verbundenen Mühen und fachlichen Hinweisen zu der Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Prof. Dr.-Ing. Dieter Dinkler für die Mitwirkung als Prüfer.

Das Arbeitsklima am iBMB im Allgemeinen und im Fachgebiet Baustoffe und Stahlbetonbau im Besonderen ist durch ein hohes Maß an Kollegialität und Motivation geprägt, was mich stets angespornt hat. Für die allgemeine Hilfs- und Diskussionsbereitschaft bedanke ich mich herzlich bei meinen Kollegen. Meinen Helfern und Gesprächspartnern, die von der Vorbereitung bis zur Auswertung der Versuche einen wertvollen Beitrag geleistet haben, bin ich zu großem Dank verpflichtet. Hierbei sind insbesondere zu nennen: David Anton, Dr. Wolfgang Augustin, Inga Beyers, Annika Bierbaum, Prof. Dr. Dirk Bockmühl, Rolf Epperlein, Lara Feldmann, Peter Hardi, Marlitt Honisch, Dr. Xin Jin, Stefan Kotula, Maike Peters, Teresa Schwandt, Tobias Seecamp und Leonid Ziegler.

Susanne Harig, Dr. Patrick Varady, Celina Fritz und meinen Eltern danke ich für das Korrekturlesen sowie den wichtigen Anmerkungen zum Text.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich vielmals für die persönliche Unterstützung, Geduld und Aufmunterung in den letzten Jahren. Ein ganz besonderer Dank gilt Jan-Philipp, der stets Verständnis für meine Arbeit hatte und somit einen wesentlichen Beitrag geleistet hat.

Inka Dreßler

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Gliederung der Arbeit.....	2
2 Nosokomiale Infektionen und die Relevanz hygienesicherer Oberflächen	4
2.1 Ursache und Transmission nosokomialer Infektionen	4
2.2 Aspekte der Infektionsprävention	6
2.3 Persistenz von Mikroorganismen auf Oberflächen	7
2.4 Zusammenfassung und Ausblick	8
3 Theorie der Partikeladhäsion und -entfernung	9
3.1 Grundlagen der Adhäsion bei ideal glatten, starren Partikeln auf Oberflächen....	9
3.1.1 Van-der-Waals-Kraft.....	10
3.1.2 Elektrostatische Kraft.....	13
3.1.3 Kapillarkraft	14
3.1.4 Gewichtskraft.....	16
3.1.5 Rechnerischer Vergleich der einzelnen Adhäsionsanteile.....	16
3.2 Adhäsionskraft von Partikeln auf Oberflächen bei nicht idealen Bedingungen.	18
3.2.1 Rauheitskennwerte	19
3.2.2 Raues, starres Partikel und glatte, starre Oberfläche.....	19
3.2.3 Raue, starre Oberfläche und glattes, starres Partikel.....	20
3.2.4 Deformierbare Kontaktpartner	21
3.3 Modelle zur Partikelablösung	23
4 Grundlagen der Reinigung.....	25
4.1 Definitionen.....	25
4.2 Kontaminationen im Krankenhaus	25
4.3 Stand der Forschung hinsichtlich der Reinigungsmechanismen sowie bisher durchgeführte Untersuchungen zur Reinigung und Reinigbarkeit.....	26
4.3.1 Reinigungsmechanismen	26
4.3.2 Untersuchungen im immmergierten System	28
4.3.3 Untersuchungen im nicht-immmergierten System	29

4.3.4	Zusammenfassung und Defizitanalyse.....	31
4.4	Verfahren zur Prüfung der Partikelreinheit von Oberflächen.....	31
5	Methoden, Material und Programm der eigenen Versuche	34
5.1	Methoden zur Charakterisierung der partikulären Ausgangskontamination und der Feststoffoberflächen.....	34
5.1.1	Partikelgrößenverteilung mittels Laserbeugung.....	34
5.1.2	Partikelcharakterisierung mittels Rasterelektronenmikroskopie	35
5.1.3	Freie Oberflächenenergie der Partikel mittels inv. Gaschromatographie ...	35
5.1.4	Fließeigenschaften mittels Ringscherzelle.....	36
5.1.5	Topographie und Ermittlung charakteristischer Rauheitskennwerte der Feststoffoberflächen	36
5.1.6	Freie Oberflächenenergie der Feststoffoberflächen mittels Kontaktwinkelmethode	37
5.2	Beschreibung der Adhäsionskraftmessung mit einzelnen Partikeln.....	38
5.3	Beschreibung der Reinigungsversuche mit Partikelkollektiven	40
5.4	Beschreibung der Besiedlungsversuche	43
5.5	Verwendete Materialien.....	44
5.5.1	Feststoffoberflächen	44
5.5.2	Partikuläre Ausgangskontamination.....	48
5.6	Versuchsprogramm.....	50
6	Experimentelle Ergebnisse und Auswertung der Adhäsionskraftmessung	51
6.1	Einfluss der Oberflächeneigenschaften.....	51
6.2	Einfluss des Einzelpartikels	55
6.3	Einfluss der Reinigung	60
6.4	Einfluss der relativen Luftfeuchte	61
6.5	Methodenkritik.....	63
6.6	Zusammenfassung der Erkenntnisse	63
7	Experimentelle Ergebnisse und Modellierung der Reinigungsversuche	65
7.1	Methodik der quantitativen Modellbildung.....	65
7.1.1	Grundüberlegung zur Modellbildung.....	66
7.1.2	Evaluation und iterative Anpassung des Modells.....	68
7.1.3	Modellanwendung und -validierung.....	72
7.2	Modellierung der Reinigung im nicht-immernierten System	72
7.2.1	Einfluss der Oberflächeneigenschaften bei partikulärer Kontamination	72

7.2.2	Einfluss der Kontamination	80
7.2.3	Einfluss der Prozessparameter	84
7.2.4	Modellvalidierung	91
7.3	Modellvorstellung	93
7.4	Methodenkritik	100
7.5	Zusammenfassung der Erkenntnisse	102
8	Wirkzusammenhänge der Persistenz von Mikroorganismen	104
8.1	Allgemeiner Hinweis zur Sterberate	104
8.2	Einfluss der Oberflächeneigenschaften	104
8.3	Einfluss der Erreger	108
8.4	Einfluss der Oligodynamik	109
8.5	Methodenkritik	110
8.6	Zusammenfassung der Erkenntnisse	111
9	Zusammenfassung, Empfehlung und Ausblick	112
9.1	Zusammenfassung und Empfehlung	112
9.2	Offene Probleme und Ausblick	117
10	Literatur	119
Anhang A: Partikelgrößenverteilung der Modellkontamination		A-1
Anhang B: Adhäsionskraftmessung		B-1
Anhang C: Mikroskopaufnahmen		C-1
Anhang D: Reinigungsversuche		D-1
Anhang E: Ergebnisse der Persistenzuntersuchung		E-1

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AFM	Rasterkraftmikroskop (Atomic Force Microscope)
BSA	Bovine Serumalbumin-Lösung
CSA	Casein-Sojapepton-Agar
DLC	Diamond Like Carbon
DMT	Derjaguin, Muller und Toporov (Theorie)
JKR	Johnson, Kendall und Roberts (Theorie)
KBE	Koloniebildende Einheit
LSM	Laserscanningmikroskop
MRSA	Methicillin-resistenter <i>S. aureus</i>
NI	Nosokomiale Infektion
PGK	Partikelgrößenkanal
PMMA	Polymethylmethacrylat
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PZ	Partikelzähler mit angeschlossener Oberflächensonde
r. F.	Relative Luftfeuchte
REM	Rasterelektronenmikroskop
SL	Streiflichtmessgerät
TSB	Casein-Sojapepton-Boullion (Tryptic Soy Broth)

Lateinische Buchstaben

A	Fläche	[m ²]
a	Abstand	[m]
a	Dimensionsloser Parameter in einer Potenzfunktion	[-]
a ₀	Berührungsabstand (angenommen mit a ₀ =0,4nm)	[nm]
b	Kontaktkreisradius	[m]
b	Dimensionsloser Parameter in einer Potenzfunktion	[-]
b ₀	Regressionskonstante	[-]
b _i	Regressionskoeffizient	[-]
c	Konstante	[-]
C	Interaktionskonstante der Polarisierbarkeit	[J]
d	Kugeldurchmesser	[m]
D	Diffusionskoeffizient	[m ² /s]
E	Elastizitätsmodul	[N/mm ²]
e	Elementarladung (e=1,602 10 ⁻¹⁹ C)	[As=C]
F	Kraft	[N]
ff _c	Fließfähigkeit	[-]
g	Erdbeschleunigung (g=9,81 m/s ²)	[m/s ²]
h	Höhe	[m]
H	Hamakerkonstante	[J]
h _i	Leverage-Wert	[-]
I	Intensität	[-]
J	Teilchenstromdichte	[mol/(m ² ·s)]

k	Anzahl der Faktoren	[-]
k	Sterberate	[h ⁻¹]
k ₀	Konstante	[-]
l	Einzelmessstrecke	[m]
p	Druck	[Pa=N/m ²]
p	Anzahl unabhängiger Variablen in der Matrix	[-]
P	Restpartikelanzahl	[-]
q	Anzahl der Atome oder Moleküle je Volumeneinheit	[-]
r	Kugelradius	[m]
R	Allgemeine Gaskonstante (R=8,3144598 [J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹])	[J/(mol·K)]
R	Hauptkrümmungsradius einer Flüssigkeitsbrücke	[m]
R ² _(adj)	(Adjustiertes) Bestimmtheitsmaß	[-]
R _a	Mittlere Rauhtiefe	[μm]
R _q	Quadratische Rauhtiefe	[μm]
s(i)	Standardabweichung der geschätzten Residuen	[-]
S	Schwellwert	[-]
t	Zeit	[h]
U _K	Kontaktpotential	[V]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
w	Anzahl der Wischhübe	[-]
W _E	Elektronenaustrittsarbeit	[eV]
x	Rauheitsdurchmesser	[m]
Z	Ordinatenwert	[μm]

Griechische Buchstaben

β ₀	Polynomkonstante	[-]
β _i	Polynomkoeffizient	[-]
δ	Randzonendicke	[m]
ε ₀	Elektrische Feldkonstante (ε ₀ =8,854 10 ⁻¹² As/Vm)	[As/Vm]
ε _r	Relative Permittivität	[-]
ε	Permittivität	[As/Vm]
γ̇	Scherrate	[1/s]
γ	Oberflächenspannung / freie Oberflächenenergie	[N/m]
K	Krümmung	[1/m]
μ	Reibkoeffizient	[-]
ν	Querdehnzahl	[-]
ρ	Rohdichte	[kg/m ³]
σ	Spannung	[N/mm ²]
Θ	Beugungswinkel	[°]
ϑ	Kontaktwinkel	[°]
τ _w	Wandschubspannung	[N/mm ²]
φ	Flächenladung	[As/μm ²]
ħw	Lifshitz-van-der-Waals-Konstante	[eV=J]

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Die Hygiene in Gesundheitseinrichtungen spielt eine entscheidende Rolle, um den Menschen vor Infektionen und damit schwerwiegenden Krankheitsverläufen zu schützen. In Krankenhäusern treffen bereits immunsupprimierte Personen aufeinander und es können auch nach der Aufnahme ins Krankenhaus neue Infektionserkrankungen entstehen, die sogenannten nosokomialen Infektionen (NI) [156].

Jährlich werden in Deutschland etwa 19,2 Mio. Personen vollstationär behandelt [182]. Hiervon erkranken jährlich bis zu 600.000 Personen an einer NI [155]. Etwa 10.000 bis 15.000 der NI verlaufen tödlich [54]. Eine erhebliche persönliche und zudem aufgrund der längeren Verweildauern auch wirtschaftliche Relevanz ist die Folge. Der infektiöse Hospitalismus wird u. a. auf mangelnde Hygiene und eine erhöhte Restverschmutzung auf Oberflächen, die im direkten und indirekten Kontakt zu Patienten stehen, zurückgeführt [100].

Das Robert Koch Institut berichtet, dass die Häufigkeit von NI in Deutschland durch geeignete Maßnahmen um ein Drittel reduziert werden kann [156]. Die Prävention kann auf verschiedenen Ebenen erfolgen, wobei die hygienisch einwandfreie Durchführung der Haus- und Flächenreinigung in hochsensiblen Bereichen aller Gesundheitseinrichtungen als ein wesentlicher Aspekt zu betrachten ist [101]. Das Patientenumfeld sollte frei von Staub und Verunreinigungen sein, um nicht nur einen ansprechenden Zustand aufzuweisen, sondern darüber hinaus Patienten, Personal und Besucher vor einem unnötig hohen Infektionsrisiko zu schützen. Krankenhausbetreiber nehmen Routinereinigung jedoch als einen Bereich mit enormem Einsparpotential wahr, sodass es zunehmend zu Zeit- und Leistungskürzungen kommt [135]. Eine möglichst wirksame Reinigung ist demnach essentiell.

Die Kontaminationsreduktion der Krankenhausumgebung über den Reinigungsprozess wird – im Gegensatz zur Verwendung von chemischen (desinfizierenden) Zusätzen – vielfach als Erfolg versprechender Ansatz verfolgt, um die potentiell pathogene Erregeranzahl auf Feststoffoberflächen zu verringern [33, 59, 60, 160]. Neben einer Kostenreduktion aufgrund geringerer Mengen an Desinfektionsmitteln und einer einhergehenden Umweltschonung, ist ein länger anhaltender Effekt der reduzierten bioziden Aktivität zu erwarten, wenn Kontaminationen von Feststoffoberflächen entfernt werden.

Bisher durchgeführte Untersuchungen zur Reinigbarkeit fokussieren primär das immergierte System, welches ein 2-Phasensystem aus Feststoffoberfläche und (Reinigungs-) Flüssigkeit darstellt [14, 108, 151, 152, 161, 165]. Versuche im nicht-immergierten System, die zudem die Gasphase beinhalten, beziehen sich oftmals auf Anlagen, die mithilfe von Flüssigkeitsstrahlen reinigen [122, 131] oder den Einfluss der Oberflächeneigenschaften vernachlässigen [189].

In Krankenhäusern wird die Reinigungsroutine i. d. R. manuell im Scheuer-Wisch-Verfahren durchgeführt [33]. Kenntnisse über die Reinigungskinetik bei diesem Prozess sind bisher unbekannt. Darüber hinaus fehlt es an Modellen, die den Zusammenhang zwischen Oberflächeneigenschaften, partikulärer Kontamination und der Reinigbarkeit herstellen.

Neben der erfolgreichen Reinigung von Oberflächen kann auch die Wahl geeigneter Materialien mit entsprechenden Oberflächeneigenschaften einen wesentlichen Beitrag leisten, um das NI-Risiko zu senken. Hierbei ist insbesondere die Persistenz (= Überlebensdauer) von Mikroorganismen auf Oberflächen, die ein potentielles Erregerreservoir darstellen, von Interesse. Die Datenlage in diesem Bereich ist bisher inkonsistent und der Einfluss von Oberflächeneigenschaften auf die Persistenz von Erregern weitestgehend unerforscht.

Das Ziel dieser Arbeit verfolgt daher die nähere Untersuchung folgender Aspekte:

- Findung einer geeigneten Methode zur Beurteilung der Reinigbarkeit von Oberflächen
- Prüfung der Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus dem oftmals untersuchten immmergierten ins nicht-immmergierte System
- Untersuchung, ob die zur Beschreibung der Reinigung oftmals verwendete Theorie der Adhäsionskräfte geeignet ist, um den Reinigungserfolg zu beschreiben
- Aufzeigen von Zusammenhängen zwischen Oberflächeneigenschaften, Kontamination und Reinigbarkeit
- Untersuchung des Einflusses von Prozessparametern auf die Reinigung
- Herausarbeiten der Reinigungskinetik, die beim Scheuer-Wisch-Verfahren im nicht-immmergierten System auftritt
- Erforschung der Wirkzusammenhänge von der Persistenz von Mikroorganismen und Feststoffen sowie deren Oberflächeneigenschaften

1.2 Gliederung der Arbeit

Zunächst wird in Kapitel 2 die Problematik der NI näher erläutert und mögliche Ansätze zur Infektionsprävention werden aufgezeigt. Das grundlegende Problembewusstsein für hygienesichere Oberflächen wird hiermit geschaffen.

Anschließend wird in Kapitel 3 die Theorie der Partikeladhäsion und -entfernung erläutert, da diese einen wesentlichen Aspekt bei der Reinigung darstellen. Nach einer Definition der wesentlichen Begriffe werden die Grundlagen der Reinigung sowie der Stand der Forschung im darauffolgenden Kapitel 4 dargelegt.

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Materialien sowie die Methoden zur Charakterisierung der Partikelsysteme und Feststoffoberflächen werden in Kapitel 5 vorgestellt. Darüber hinaus werden die verwendeten Versuchsstände zur Messung der Adhäsionskräfte, zur Überprüfung der Reinigbarkeit sowie das experimentelle Vorgehen zur Untersuchung der Persistenz von Mikroorganismen beschrieben.

Die mit den beschriebenen Methoden zur Charakterisierung der Oberflächen und Partikelsysteme erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 5.5 dargestellt. Das Versuchsprogramm wird in Kapitel 5.6 vorgestellt.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Adhäsionskraftmessungen mit Einzelpartikeln vorgestellt und ausgewertet. Es werden Einflussgrößen auf die gemessene Adhäsion untersucht, die aus der Theorie der Adhäsionskräfte abgeleitet werden.

Auf Basis der Messergebnisse der Reinigungsversuche erfolgt in Kapitel 7 die weiterführende Analyse und Modellbildung. Hierbei werden sowohl quantitative Zusammenhänge zur Beschreibung der Reinigbarkeit von Feststoffoberflächen im nicht-immernierten System als auch eine qualitative Modellvorstellung für die Reinigungskinetik entwickelt.

In Kapitel 8 wird die Persistenz von Mikroorganismen auf Feststoffoberflächen analysiert. Die Zellzahl wird zu unterschiedlichen Zeitpunkten in Abhängigkeit von den Oberflächeneigenschaften ausgewertet.

Abschließend werden die erzielten Erkenntnisse in Kapitel 9 zusammen gefasst, Empfehlungen für praxistaugliche hygienesichere Oberflächen gegeben und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

2 **Nosokomiale Infektionen und die Relevanz hygiesicherer Oberflächen**

Eine NI liegt vor, wenn die Infektion bei der Aufnahme des Patienten in das Krankenhaus noch nicht vorhanden und der Patient zu dem Zeitpunkt auch noch nicht mit dem pathogenen (= krankmachenden) Mikroorganismus infiziert war. Zur vereinfachten Erfassung von NI werden Infektionen, die ab Tag drei im Krankenhaus auftreten, als nosokomial bezeichnet [155, 190].

Die Ursache und Transmission von NI sowie mögliche Maßnahmen zur Senkung der Infektionsrate werden im Folgenden kurz erläutert.

2.1 **Ursache und Transmission nosokomialer Infektionen**

Es ist davon auszugehen, dass deutschlandweit jährlich ca. 80.000 bis 180.000 NI durch die Ergreifung präventiver Maßnahmen vermeidbar sind [55].

Die wichtigsten Erreger, die eine NI verursachen, sind jeweils abhängig von der betrachteten Infektionsart [156]. In einer nationalen Punkt-Prävalenzstudie im Jahr 2011, die an über 40.000 Patienten in 132 Krankenhäusern durchgeführt wurde, führten integral betrachtet in 31% der Fälle *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*), in 14% der Fälle *Escherichia coli* (*E. coli*) und in 12% der Fälle *Enterococci* zu einer NI [155]. Darüber hinaus werden oftmals *Pseudomonas aeruginosa* (*Ps. aeruginosa*) oder *Candida albicans* (*C. albicans*) als Auslöser einer NI identifiziert. Hierbei kann die Entstehung von NI auf endogene und exogene Ursachen zurückgeführt werden. Letztere machen bis zu 30% der nosokomialen Infektionen aus [190].

Endogene Infektionen können aus der patienteneigenen Bakterienflora resultieren (primäre endogene Infektion) und führen aufgrund eines supprimierten Immunsystems zur Infektion. Alternativ wird der infektionsauslösende Erreger erst im Laufe des Krankenhausaufenthaltes Teil der patienteneigenen Bakterienflora (sekundäre endogene Infektion) [156, 220]. Dies geschieht oftmals durch invasive medizinische Maßnahmen wie Injektionen, Infusionen oder Katheter, wobei die dabei in den Körper eindringenden Bakterien zu einer Infektion führen [190]. Exogene Infektionen sind hingegen das unmittelbare Ergebnis der Aufnahme der Infektionserreger aus der Umgebung. Pathogene Erreger können über den direkten Kontakt mit Personen (z. B. Hände des Personals) oder indirekt mittels kontaminierter Flächen und Gegenstände sowie über ein Medium (Luft/Wasser) übertragen werden. Die Anzahl der Kontaktinfektionen (80-90%) überwiegt gegenüber der medieninduzierten Infektion (10-20%) deutlich (vgl. Abbildung 1) [110].

Durch die Ergreifung geeigneter Maßnahmen ist es möglich, primär exogen bedingte Infektionen zu reduzieren [35, 190]. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher Materialien untersucht, die üblicherweise in relevanten Bereichen im Krankenhaus verwendet werden und direkt oder indirekt mit dem Patienten, Personal oder Besucher in Kontakt kommen. Das Potential zur Reduktion des Infektionsrisikos betrifft insbesondere Armaturen, Mobiliar, Boden- und Wandbeläge (vgl. Abbildung 2).

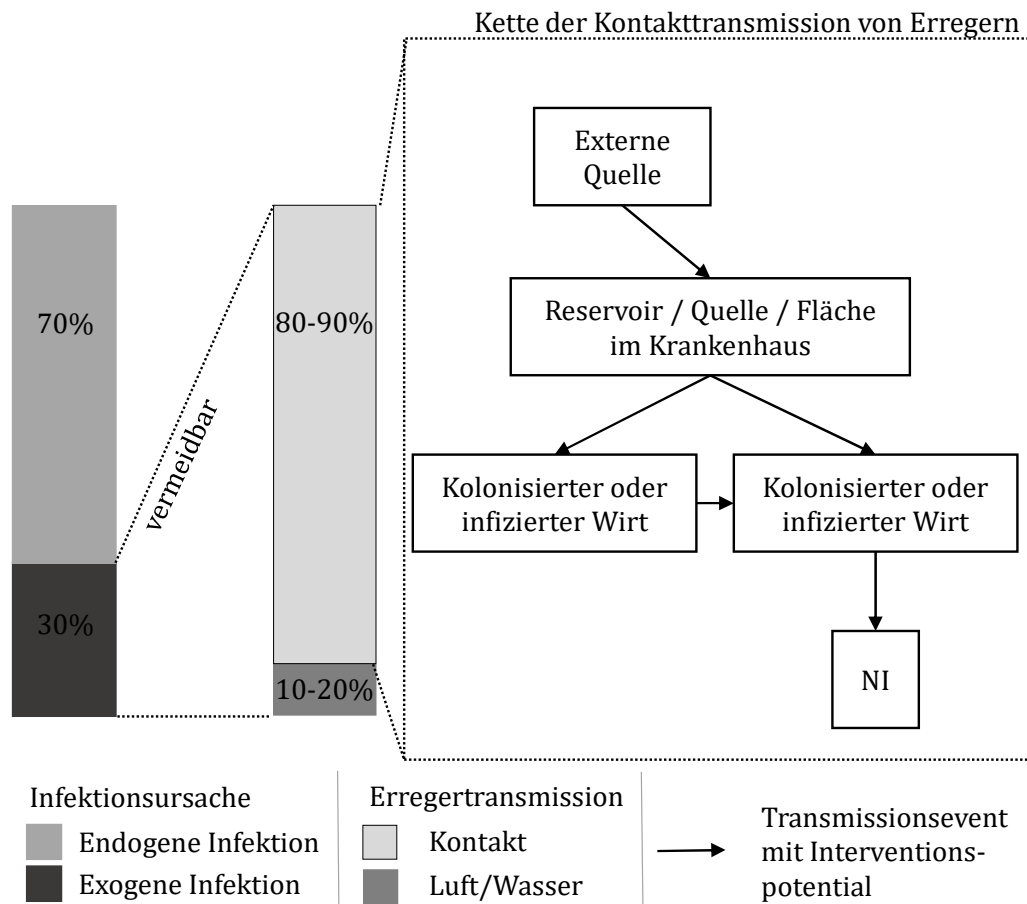


Abbildung 1: Relevanz der Kontaktinfektion und die zur Kontaktinfektion führende Transmissionskette von Erregern

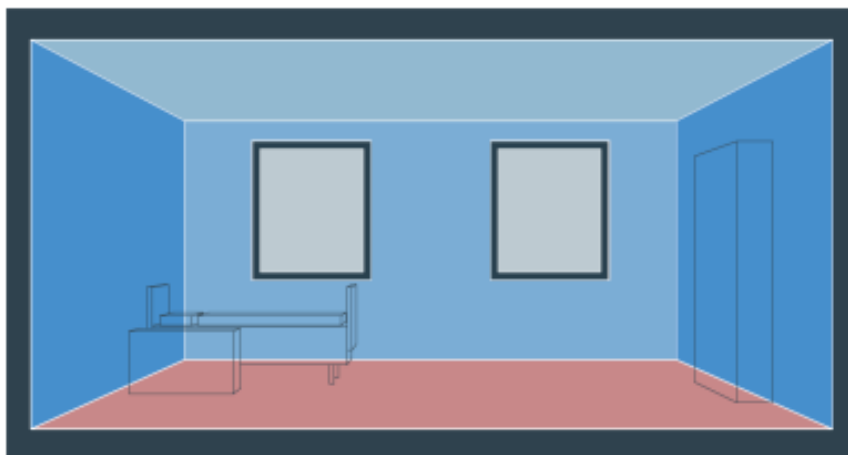


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Patientenzimmers im Krankenhaus

2.2 Aspekte der Infektionsprävention

Um die Anzahl der Ausbrüche zu reduzieren, die Transmission von Erregern zu vermeiden und folglich die NI-Rate zu senken, sind verschiedene präventive Maßnahmen möglich.

In diesem Zusammenhang werden vertikale von horizontalen Präventionsmaßnahmen unterschieden [172, 190]. Erstere fokussieren sich auf die Verminderung der Kolonisierung und Infizierung eines bestimmten Erregers. Letztere werden bei allen Patientengruppen gleichermaßen umgesetzt und richten sich gegen alle Erreger. Ein wesentlicher Bestandteil der horizontalen Präventionsmaßnahmen ist die Reduktion der Kontakttransmission von Erregern. Hierbei werden verschiedene Ansatzpunkte verfolgt [183]:

- I. Reinigungs- und Desinfektionsstrategie von Flächen: Obwohl die Zellzahlreduktion beim Desinfizieren von Flächen höher ist als bei einer regulären Scheuer-Wisch-Reinigung, zeigt sich kein signifikanter Unterschied in der NI-Rate. Es ist zu berücksichtigen, dass die Bedeutung von unbelebten Flächen als Quelle der NI wissenschaftlich nur in geringem Umfang untersucht ist. In der Literatur (z. B. [69, 72, 136, 163, 174]) wird jedoch von ausbruchartigen Erregerübertragungen von Flächen berichtet, sodass diese folglich einen festen Bestandteil des Multibarrierensystems der Infektionsprävention darstellen [101, 173]. Es wird angenommen, dass die Reinigung und Desinfektion von Flächen einen essentiellen Baustein zur Reduktion des Erregerreservoirs auf Flächen darstellt und die Übertragungswege der Erreger aus der Umwelt auf den Patienten unterbricht [31, 35, 173]. Die hygienisch einwandfreie Durchführung der Reinigung in Krankenhäusern oder anderen medizinischen Bereichen wird daher als unerlässlich betrachtet [101]. Ungeklärt ist bisher, welche Material- und Oberflächeneigenschaften eine wirksame Scheuer-Wisch-Reinigung unterstützen.
- II. Physikalische Barriere: Die Unterbringung von Patienten in Einzelzimmern oder andere physikalische Barrieren reduzieren das Transmissionsrisiko (pathogener) Erreger durch eine räumliche Trennung. In Deutschland ist jedoch die Ausstattung einzelner Stationen mit Einzelzimmern defizitär [187]. Dieses Defizit kann lediglich beim Neubau oder bei wesentlichen Umbaumaßnahmen behoben werden. Demzufolge wird die bauliche Struktur (z. B. Anordnung der Räume und Raumgestaltung zur Unterstützung betrieblicher Prozesse) als ein erfolgversprechender Ansatz zur Reduktion des NI-Risikos betrachtet [21, 26, 95]. Die gezielte Raumausstattung mit Materialien, die die Persistenz von Mikroorganismen reduzieren, wird bisher kaum umgesetzt. Die Einflüsse von Oberflächeneigenschaften werden in diesem Zusammenhang bislang nicht betrachtet.
- III. Infrastruktur für Händehygiene: Die Hände sind der wesentliche Übertragungsweg bei Kontaktinfektionen [127]. Problematisch ist, dass die Händedesinfektion in 50% der Fälle nicht durchgeführt wird [91]. Dies ist möglicherweise auch auf die nicht hinreichende Ausrüstung von Krankenhäusern mit Händedesinfektionsmittelspendern zurück zu führen [188]. Über den Handkontakt mit kontaminier-

ten, unbelebten Flächen ist eine Erregertransmission oder eine unmittelbare Infektion möglich. Problematisch in diesem Zusammenhang ist, dass Erreger auf unbelebten Flächen bis zu mehrere Monate lang überleben [90, 102].

Gemäß dem Multibarrierenansatz ist nicht nur ein Kettenglied der Infektionskette zu unterbrechen, sondern eine Vielzahl an Ansätzen zu verfolgen [110, 220].

2.3 Persistenz von Mikroorganismen auf Oberflächen

Die Persistenz eines Erregers beschreibt dessen Überlebensdauer und hängt von diversen Faktoren ab, wie den Eigenschaften der Mikroorganismen selbst, vorliegenden Umweltbedingungen, der Luftfeuchtigkeit und der Zusammensetzung der Matrix, in welcher die Mikroorganismen eingebettet sind.

Bakterien werden in zwei Gruppen (gram-positiv / gram-negativ) eingeteilt, die sich hinsichtlich dem Aufbau ihrer Zellwände unterscheiden. Die bakterielle Flora in Krankenhäusern wird von gram-positiven Bakterien dominiert, wozu hauptsächlich die Kokken gehören [154]. Diese weisen im Allgemeinen eine höhere Austrocknungsresistenz als gram-negative (im Wesentlichen Stäbchen-) Bakterien auf [5]. Für gram-positive Bakterien wie *S. aureus* (inkl. Methicillin-resistentem *S. aureus*, MRSA) wurden auf trockenen, unbelebten Oberflächen Überlebensdauern von sieben Tagen bis zu sieben Monaten beobachtet [102]. Anders als bei vielen anderen Bakterien, die bei hoher Luftfeuchtigkeit (> 70%) längere Persistenzen aufweisen, wurde für *S. aureus* eine längere Persistenz bei niedriger Luftfeuchtigkeit festgestellt [102, 215]. Zudem verlängern niedrige Umgebungstemperaturen (4°C bis 6°C) die Persistenz [134], ebenso wie hohe Ausgangszellzahlen [132] und nährstoff- oder proteinhaltige Matrices [133]. Es ist anzunehmen, dass auch die Beschaffenheit der Materialoberflächen, auf denen sich die Mikroorganismen befinden, die Persistenz beeinflusst.

Bisherige Untersuchungen dazu beziehen sich auf verschiedene Materialgruppen und zeigen inkonsistente Ergebnisse auf [102]: Studien von PÉREZ ET AL. [139] sowie NEELY [132] wiesen für Bakterien auf Polyvinylchlorid (PVC) eine längere Persistenz als auf Baumwolle und Baumwoll-Polyester-Mischgewebe nach. Dass dieser Effekt materialspezifisch ist, zeigt der Vergleich mit Arbeiten von WEBSTER ET AL. [207], die eine größere Persistenz von *S. aureus* auf Edelstahl als auf Formica-Laminat nachwiesen. In anderen Untersuchungen wurde hingegen ein Einfluss des Materials auf die Überlebensdauer ausgeschlossen [5, 211]. Neben einem möglichen Einfluss unterschiedlicher Rezepturen verschiedener PVC, lassen sich diese Inkonsistenzen dadurch erklären, dass Oberflächen nicht ausschließlich durch ihre Materialzusammensetzung zu charakterisieren sind. Weitere Oberflächeneigenschaften könnten die Persistenz darüber hinaus beeinflussen. Die Datenlage zum Einfluss der Oberflächeneigenschaften ist jedoch nicht ausreichend, um eine gezielte Auswahl von Materialparametern, die die Persistenz verringern, zu ermöglichen. Der Zusammenhang zwischen Oberflächeneigenschaften von Materialien und der Persistenz von Mikroorganismen wurde bisher kaum untersucht. Studien bestätigen bisher vorwiegend einen Zusammenhang zwischen der Initialadhäsion von Keimen auf

Oberflächen und den Oberflächeneigenschaften [129, 148, 201]. Daher ist der Einfluss der Oberfläche auf die Persistenz von Erregern zu untersuchen, die die wesentliche Ursache von NI darstellen und eine hohe Persistenz bei der Luftfeuchtigkeit, die im Krankenhaus üblich ist (30-60 % r. F.), aufweisen.

2.4 Zusammenfassung und Ausblick

NI haben eine hohe Relevanz und sind in etwa einem Drittel der Fälle vermeidbar. Hierbei ist *S. aureus* der Erreger, welcher am häufigsten zu einer NI führt. Um geeignete Maßnahmen zur Minimierung des NI-Risikos zu treffen, müssen alle denkbaren Erregertransmissionsketten berücksichtigt werden [19]. Kontaminierte bzw. nicht ausreichend gereinigte Oberflächen bilden ein Erregerreservoir und stellen somit einen Übertragungsweg für NI dar. Als *hygienesicher* wird eine Feststoffoberfläche eingestuft, wenn sich diese leicht reinigen lässt und die Überlebensdauer von Mikroorganismen auf ein Minimum reduziert wird. Interventionspotential bieten folglich eine gute Reinigungsstrategie (starke Reduktion der Erreger auf den Flächen), die durchdachte Materialwahl und deren Oberflächengestaltung sowie baulich-funktionelle Aspekte (physikalische Barrieren sowie die Bereitstellung einer angemessenen Händehygieneinfrastruktur). Die hierbei relevanten Zusammenhänge zwischen Oberflächeneigenschaften, Reinigungsintensität und Materialwahl einerseits sowie Reinigungserfolg und Persistenz von Mikroorganismen andererseits sind bisher nicht hinreichend erforscht und sind daher Gegenstand der Untersuchung.

3 Theorie der Partikeladhäsion und -entfernung

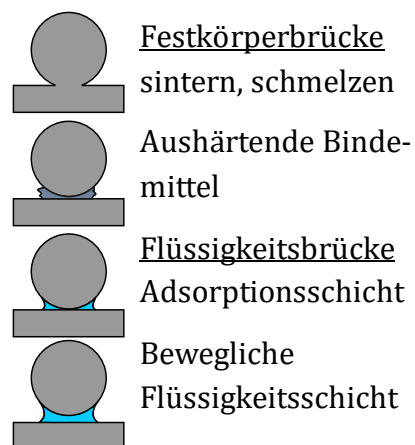
Interatomare und intermolekulare Kräfte sind bei Prozessen der Agglomeration, dem Feststofftransport oder aber bei der Reinigung von Relevanz, da diese zur Entfernung von partikulären Kontaminationen zu überwinden sind.

Der Stand des Wissens zu den einzelnen Kraftkomponenten sowie deren Ausprägung in Abhängigkeit der Randbedingungen wird in diesem Kapitel aufgezeigt.

3.1 Grundlagen der Adhäsion bei ideal glatten, starren Partikeln auf Oberflächen

Auf makroskopischer Ebene können Adhäsionsmechanismen in gasförmiger Umgebung nach SCHUBERT [169] und RUMPF [157] in Bindungen mit und ohne Materialbrücke unterteilt werden. Verbindungen mit Festkörperbrücken können durch Sintern, chemische Reaktion, Schmelzhaftung oder erhärtende Bindemittel entstehen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass sich eine flüssige Materialbrücke ausbildet – welche je nach Viskosität der Flüssigkeit und Dicke der Adsorptionsschicht als starr oder beweglich angenommen wird – und attraktiv wirkt. Ohne Anwesenheit einer stofflichen Materialbrücke sind die molekularen van-der-Waals-Kräfte sowie die elektrostatischen Kräfte relevant. Bei Letzteren werden die Kräfte von Leitern und Isolatoren unterschieden, wobei deren Einteilung über die Beweglichkeit von Ladungsträgern im Körper erfolgt. Ferner kann es zu einer formschlüssigen Verbindung der Kontaktpartner kommen. Im Folgenden werden die Adhäsionskräfte ohne Festkörperbrücke und ohne formschlüssige Verbindung näher betrachtet, da diese für die Reinigung von Bedeutung sind. Eine übersichtliche Einteilung der Bindemechanismen ist in Abbildung 3 gegeben.

Mit stofflicher Verbindung



Ohne stoffliche Verbindung

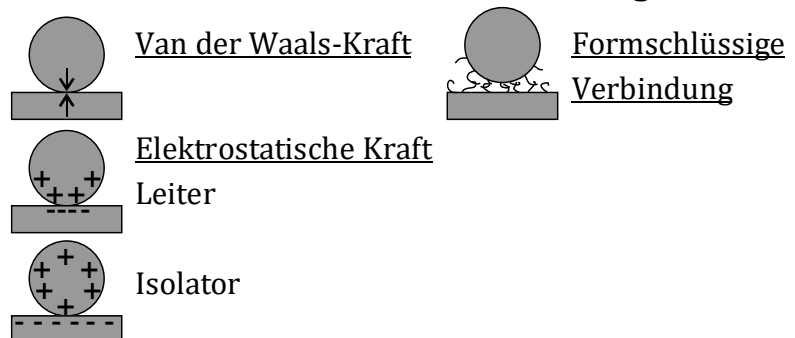


Abbildung 3: Bindungsmechanismen zwischen Partikeln in gasförmiger Umgebung nach RUMPF [157] und SCHUBERT [169]

Liegen Stoffe in Flüssigkeiten suspendiert vor, so sind die gleichen Wechselwirkungsmechanismen in anderer Ausprägung relevant; dies wird u. a. in [17, 74, 186] beschrieben.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Adhäsionskraft F_{adh} [N] als Summe der einzelnen Adhäsionskraftanteile definiert:

$$F_{adh} = F_{vdW} + F_{el} + F_{kapillar} + F_G \quad (1)$$

Hierbei ist F_{vdW} [N] die van-der-Waals-Kraft, F_{el} [N] die elektrostatische Kraft, $F_{kapillar}$ [N] die Kapillarkraft und F_G [N] die Gewichtskraft. Die Berechnung der einzelnen Kräfte erfolgt oftmals auf Basis verschiedener idealisierter Fälle: das Platte-Platte-Modell, das Kugel-Kugel-Modell sowie das Kugel-Platte-Modell. Das letztgenannte beschreibt das System einer partikulären Kontamination auf einer Oberfläche am besten, sodass ausschließlich dieses im Folgenden vorgestellt wird. Die anderen genannten Modelle werden u. a. in [7, 17, 169] beschrieben.

3.1.1 Van-der-Waals-Kraft

Van-der-Waals-Kräfte entstehen zwischen zwei Dipolen und fassen drei Arten von Wechselwirkungen zusammen [84]:

- Debye-Induktionskraft zwischen einem permanenten und einem induzierten Dipol
- Keesom-Orientierungskraft zwischen zwei permanenten Dipolen
- London-Dispersionskraft zwischen zwei induzierten Dipolen.

Hierbei hat die London-Dispersionskraft die höchste Relevanz, da zeitlich begrenzte Dipolmomente aufgrund der Elektronenbewegung auch zwischen (ungeladenen und nicht polaren) Molekülen und Atomen entstehen [84]. Aus diesem Grund wird im Folgenden ausschließlich die London-van-der-Waals-Kraft (sog. van-der-Waals-Kraft im engeren Sinne) betrachtet.

Um die van-der-Waals-Kräfte zu berechnen, kann entweder die mikroskopische Theorie nach HAMAKER [71] oder die makroskopische Theorie nach LIFSHITZ [46] herangezogen werden.

Mikroskopische Theorie nach Hamaker

Die von HAMAKER [71] entwickelte Theorie addiert die Kräfte, die aus den Wechselwirkungen einer Vielzahl an Molekülen resultieren, auf. Wird der ideale Fall Kugel-Platte betrachtet, berechnet sich die van-der-Waals-Kraft wie folgt:

$$F_{vdW,Hamaker} = \frac{H d}{12 a^2} \quad (2)$$

Hierbei ist H [J] die Hamakerkonstante, die die Stärke der Wechselwirkungen zwischen Kugel und Platte in Abhängigkeit vom Umgebungsmedium beschreibt. Die Größe der Hamakerkonstante liegt üblicherweise im Bereich 10^{-20} - 10^{-19} J [84]. d [m] ist der Durchmesser des Partikels und a [m] der Abstand zwischen Partikel und Oberfläche. Im Kontaktfall

ist ein Berührungsabstand anzusetzen, welcher im Bereich einer Atomgröße liegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird $a_0 \approx 4 \text{ \AA} = 0,4 \text{ nm}$ angenommen¹, sodass die van-der-Waals-Kräfte nicht unendlich groß werden können [7, 84, 169, 186]. Die Anwendung für Gleichung (2) beschränkt sich auf den Fall $a \ll d$.

Die Hamakerkonstante H zwischen zwei gleichartigen Stoffen im Vakuum ist wie folgt definiert:

$$H_{11} = \pi^2 C q_1^2 \quad (3)$$

Hierbei ist q_1 [-] die Anzahl der Atome bzw. Moleküle je Volumeneinheit des betrachteten Körpers 1 und C [J] eine materialbezogene Konstante zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen den Teilchen [107]. H kann auch mithilfe der freien Oberflächenenergie γ berechnet werden [77].

Liegen zwei unterschiedliche Feststoffe 1 und 2 vor, die von einem Medium 3 umgeben werden, so kann die Hamakerkonstante näherungsweise² berechnet werden [84, 202]:

$$H_{132} = (\sqrt{H_{11}} - \sqrt{H_{33}})(\sqrt{H_{22}} - \sqrt{H_{33}}) \quad (4)$$

Oftmals ist die van-der-Waals-Kraft eine attraktive Kraft. Der Gleichung (4) kann entnommen werden, dass auch negative Hamakerkonstanten erreicht werden können. Wenn der Sonderfall $H_{22} < H_{33} < H_{11}$ oder $H_{11} < H_{33} < H_{22}$ gilt, resultiert eine abstoßende Kraft. Bei den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Systemen, ist ausschließlich von anziehenden Kräften auszugehen.

Die Tabelle 1 zeigt Hamakerkonstanten verschiedener Materialien. Die Hamakerkonstante ist aufgrund verschiedener Berechnungs- und Messmethoden nicht immer eindeutig bestimmbar und führt zu streuenden Ergebnissen.

Tabelle 1: *Hamakerkonstanten für unterschiedliche Materialien im Vakuum* [74, 77, 84, 109, 202]

Material	Hamakerkonstante 10^{-20} [J]
Aluminiumoxid (Al_2O_3)	14 – 15,5
Edelstahl	6,7 – 8,1
Eisenoxid (Fe_3O_4)	21 – 21,2
Kupfer	28,4
Luft	0
Polystyrol (PS)	6,5 – 9,8
Quarz (SiO_2)	4,2 – 7,93
Silber	20,3 – 40
Silizium	22,1 – 25,6
Wasser	3,7 – 4,4

¹ Dieser Wert liegt im Bereich einer monomolekularen Wasserschicht, die sich unter Umgebungsbedingungen auf einer Oberfläche bildet.

² Es ist eine ausreichend gute Näherung für Medien mit kleiner relativer Permittivität zu erzielen [77].

Makroskopische Theorie nach Lifshitz

Die von LIFSHITZ ET AL. entwickelte Theorie [46] betrachtet Wechselwirkungen nicht auf atomarer Ebene, sondern führt die Kräfte auf messbare Feststoffeigenschaften zurück. Sie zeigt, dass die van-der-Waals-Kraft hauptsächlich von dem Zwischenmedium zwischen zwei Körpern und der relativen Permittivität der Kontaktpartner, die die Durchlässigkeit des Materials für elektrische Felder beschreibt, abhängt. Ist die relative Permittivität des Zwischenmediums kleiner als die der Körper, so handelt es sich um eine resultierende attraktive Kraft. Eine repulsive Kraft wird erzeugt, wenn die relative Permittivität des Zwischenmediums zwischen den Permittivitäten der Körper liegt. Ist das Zwischenmedium Luft ($\epsilon \approx 1$), so resultiert eine attraktive Kraft.

Für die Berechnung der van-der-Waals-Kraft im Kugel-Platte-Modell gilt folgender Zusammenhang:

$$F_{vdW, Lifshitz} = \frac{\hbar \omega d}{16 \pi a^2} \quad (5)$$

Hierbei ist $\hbar \omega$ [eV=J] die Lifshitz-van-der-Waals-Konstante, d [m] der Kugeldurchmesser und a [m] der Abstand zwischen Partikel und Oberfläche. Auch bei der makroskopischen Theorie ist ein Berührungsabstand a im Kontaktfall von 4 \AA anzunehmen [7]. Die Lifshitz-van-der-Waals-Konstante liegt zwischen $0,1 - 10 \text{ eV} = 0,16 - 16 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ [130].

Die Lifshitz-van-der-Waals-Konstante³ $\hbar \omega$ kann nach [128] für zwei Feststoffe 1 und 2, die von einem Fluid 3 umgeben sind, näherungsweise berechnet werden:

$$\hbar \omega_{132} = \hbar \int_0^\infty \frac{\epsilon_1(i\xi) - \epsilon_3(i\xi)}{\epsilon_1(i\xi) + \epsilon_3(i\xi)} \cdot \frac{\epsilon_2(i\xi) - \epsilon_3(i\xi)}{\epsilon_2(i\xi) + \epsilon_3(i\xi)} \cdot d(i\xi) \quad (6)$$

Hier ist ϵ [As/Vm] die Permittivität des Feststoffs/Fluids, die über die imaginäre Frequenz $i\xi$ integriert wird.

Die Lifshitz-Theorie wird jedoch aufgrund der Komplexität der Gleichung und des Mangels an verfügbaren frequenzabhängigen Daten, die für die Berechnung notwendig sind, wenig angewendet [107].

Es besteht die Möglichkeit die Lifshitz-van-der-Waals-Konstante über die Hamaker-Konstante hinreichend genau zu ermitteln [103, 202]:

$$\hbar \omega = \frac{4}{3} \pi H \quad (7)$$

³ Die Lifshitz-van-der-Waals-Konstante ist genau genommen keine Konstante, da sie sowohl temperatur- als auch frequenzabhängig ist. Die Begrifflichkeit wird jedoch übernommen, da sie in der Literatur etabliert ist.

3.1.2 Elektrostatische Kraft

Sind zwei Partikel elektrisch gegenpolig geladen, ziehen sie sich an [1]. Unterschiedliche Ladungen treten entweder aufgrund von Elektronenaustritt oder Oberflächenadsorption von Ionen auf.

Wechselwirkungen aufgrund von Elektronenaustritt

Partikel weisen jeweils eine materialspezifische Elektronenaustrittsarbeit W_E [eV] auf [10, 181]. Elektronenaustrittsarbeit ist die Arbeit, die benötigt wird, um ein Elektron aus einem Festkörper heraus zu transportieren.

Liegt eine unterschiedliche Elektronenaustrittsarbeit zweier Festkörper im Kontakt vor, wandern Elektronen vom Festkörper mit der geringeren Elektronenaustrittsarbeit in den Körper mit der größeren Elektronenaustrittsarbeit, der sich daraufhin negativ auflädt [169]. Dies geschieht bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die gegenpolige Ladung der Körper führt zu anziehenden Kräften zwischen den Festkörpern. Das zwischen den Festkörpern (z. B. Partikel) vorherrschende Kontaktpotential U_K [V] hängt von der Stoffkombination und dem Oberflächenzustand der Festkörper ab und wird oftmals mit 0,05 – 0,7 V abgeschätzt [74]. Bei elektrisch leitenden Materialien konzentrieren sich die Ladungen im Kontaktbereich, sodass höhere elektrostatische Wechselwirkungen als bei Isolatoren resultieren. Bei nicht leitenden Materialien dehnt sich eine Ladungsträgerschicht bis zu einer Tiefe von 1 μm unter der Oberfläche aus, sodass sich ein geringes Kontaktpotential ausbildet.

Die elektrostatische Kraft F_{el} [N] zwischen einem kugeligen Festkörper und einer glatten Oberfläche berechnet sich für leitende und nicht-leitende Materialien unterschiedlich, da ein unterschiedlicher Ladungsabfluss vorliegt. Für leitende Materialien gilt folgender Zusammenhang [169]:

$$F_{el,Leiter} = \pi \varepsilon_r \varepsilon_0 U_K^2 \frac{r}{a} \quad (8)$$

Hierbei ist ε_r [-] die relative Permittivität, ε_0 [As/Vm] die elektrische Feldkonstante, U_K [V] das Kontaktpotential zwischen den beiden Haftpartnern, r [m] der Partikelradius und a [m] der Abstand des Partikels zur Wand.

Für Isolatoren ist die elektrostatische Kraft im idealisierten Kugel-Platte-Modell ebenfalls berechenbar:

$$F_{el,Isolator} = \frac{2\pi}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \varphi_1 \varphi_2 r^2 \quad (9)$$

Dabei ist φ [As/ μm^2] die Flächenladung, die maximal $\varphi_{max} = 100\text{e}/\mu\text{m}^2$ beträgt [169].

Ist der Abstand a eines Partikels von einer Wand/Platte kleiner als sein Durchmesser d sind die Gleichungen (8) und (9) anwendbar [169]. Bei größeren Abständen findet keine Ladungsverschiebung auf den Festkörperoberflächen statt, sodass die Kräfte stark reduziert werden und mit den genannten Gleichungen nicht korrekt abgebildet werden.

Wechselwirkung aufgrund von Elektronenüberschuss

Elektrostatische Kräfte resultieren aus Festkörperoberflächenladungen, die durch verschiedene Prozesse gebildet werden können [84]: Ionisation oder Dissoziation von chemisch-funktionellen Gruppen an Oberflächen oder Adsorption von Ionen auf einer ungeladenen Oberfläche. Die Aufladung der Phasengrenzfläche führt zu einer ungleichen Verteilung geladener Teilchen und es bildet sich eine sogenannte elektrische Doppelschicht [186]. In gasförmiger Umgebung ist die Elektrostatik irrelevant, da die an der Oberfläche adsorbierten Ladungsträger durch eine hohe Beweglichkeit der Gegenionen im Umgebungsmedium ausgeglichen werden [74]. In flüssiger Umgebung kommt dem eben beschriebenen Phänomen eine erhebliche Bedeutung zu. Im Rahmen dieser Arbeit wird das nicht-immernierte System betrachtet, sodass auf die Ausbildung der elektrostatischen Kräfte in flüssiger Umgebung nicht weiter eingegangen wird. Es sei auf die Beschreibung der Modellvorstellung der Doppelschicht u. a. in [23, 115, 186] verwiesen.

3.1.3 Kapillarkraft

Ist Feuchtigkeit in gasförmiger Umgebung vorhanden, entstehen Flüssigkeitsbrücken aufgrund von Kapillarkondensation an den Grenzflächen der Haftpartner (Dreiphasenkontakt) [25]. Das Ausmaß der Kapillarkondensation wird maßgeblich durch die Materialeigenschaften der beteiligten Festkörper und die relative Luftfeuchte beeinflusst. Teilchen an der Oberfläche einer Phase besitzen eine höhere Energie als Teilchen im Inneren, sodass über die gekrümmte Phasengrenze eine Druckdifferenz entsteht [107]. Folglich haftet ein kugeliges Partikel auf einer glatten Oberfläche aufgrund des vorherrschenden kapillaren Unterdrucks. Ab einer relativen Luftfeuchte von ca. 65% ist die Wasserkapillare voll ausgebildet und macht die Kapillarkraft vereinfacht berechenbar [7, 143, 219].

Das Phänomen der Kapillarkondensation lässt sich mit der Young-Laplace-Gleichung beschreiben [73]:

$$p_k = p_{gas} - p_{flüssig} = \gamma K \quad (10)$$

Der Kapillardruck p_k [Pa] entspricht der Differenz aus Gas- und Flüssigkeitsdruck und ergibt sich aus der Oberflächenspannung der Flüssigkeit γ [N/m] und der Krümmung des Meniskus K [m⁻¹]. Die Krümmung kann für eine beliebig gekrümmte Fläche über die Hauptkrümmungsradien der Flüssigkeitsbrücke R_1 [m] und R_2 [m] berechnet werden (vgl. Abbildung 5) [141, 198]:

$$K = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \approx -\frac{1}{R_2}, \text{ da } R_1 \gg R_2 \quad (11)$$

Die negative Krümmung führt automatisch zu einem negativen Kapillardruck, der als Unterdruck definiert ist und zu einer attraktiven Kraft zwischen Ebene und Partikel führt.

Die geometrische Ausdehnung der Flüssigkeitsbrücke ausgedrückt als Hauptkrümmungsradius der Flüssigkeitsbrücke R_1 [m] variiert gemäß der Kelvin-Gleichung [195] in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte p/p_s [-] [146]:

$$R_1 = \frac{-4\gamma V_m r}{RT \ln(\frac{p}{p_s})} \quad (12)$$

Hierbei ist r [m] der Partikelradius, V_m [m³/mol] das molare Volumen des Fluids, R [J/(mol·K)] die allgemeine Gaskonstante T [K] die Temperatur und γ [mN/m] die Oberflächenspannung der Flüssigkeit. Die Zunahme des Hauptkrümmungsradius R_1 mit steigender relativer Luftfeuchte ist in Abbildung 4 dargestellt.

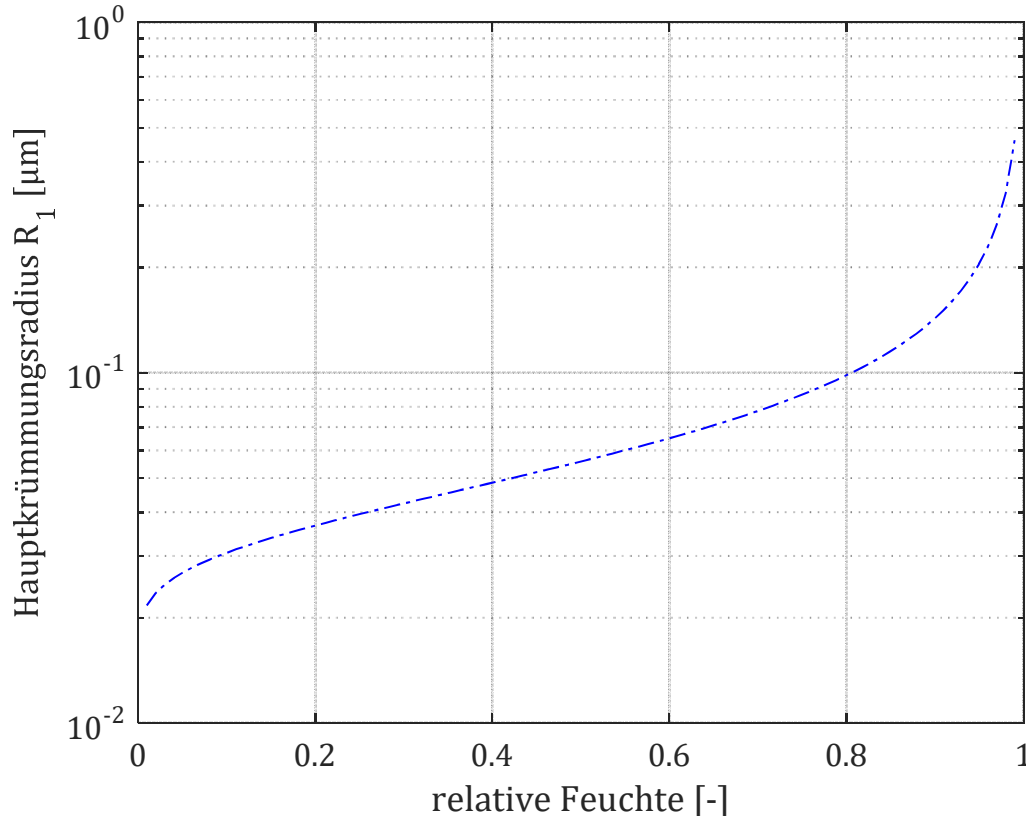


Abbildung 4: Hauptkrümmungsradius R_1 in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte

Die Kapillarkraft $F_{Kapillar}$ [N] ergibt sich bei rotationssymmetrischen Flüssigkeitsbrücken aus dem Kapillardruck, der über die benetzte Querschnittsfläche A [m²] wirkt, die vereinfachend als Kreis angenommen werden kann [10, 73]. Bei vollständiger Benetzung ergibt sich:

$$F_{Kapillar} = A p_k \approx 4\pi r \gamma \quad (13)$$

Hierbei wurde $A \approx 4\pi R_2$ abgeschätzt, da $R_1 \gg R_2$ ist. Eine schematische Darstellung der Ausbildung einer Flüssigkeitsbrücke zwischen einem kugeligen Partikel und einer Ebene erfolgt in Abbildung 5.

Gemäß der Gleichung (13) wird idealisiert angenommen, dass die Kapillarkraft zwischen einem Partikel und einer Ebene unabhängig vom vorherrschenden Dampfdruck ist. Makroskopische Parameter, wie die Oberflächenspannung der benetzenden Flüssigkeit

(i. d. R. Wasser mit $\gamma = 72,8 \text{ mN/m}$) und der Partikelradius r , haben bei der Ausbildung der kapillaren Haftkraft einen wesentlich größeren Einfluss. Bei der genannten Gleichung handelt es sich um eine Näherungslösung, die in der Literatur als hinreichend genau angenommen wird [7, 74].

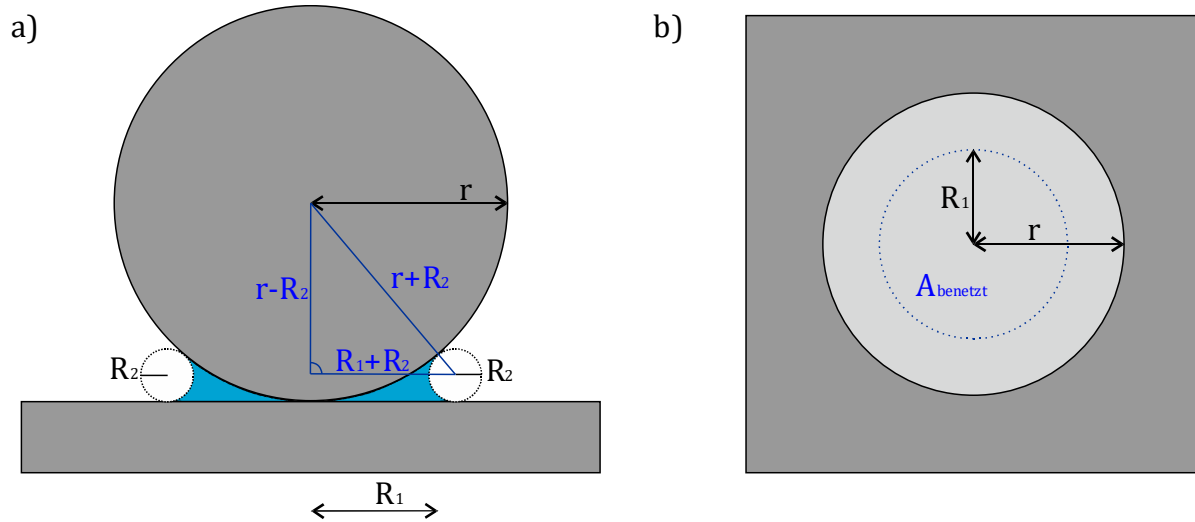


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Flüssigkeitsbrücke zwischen einer Kugel und einer Platte: a) Ansicht b) Draufsicht

3.1.4 Gewichtskraft

Die Gewichtskraft kann - je nach Anordnung von Partikel und Ebene – die Adhäsionskraft zwischen den Haftpartnern verstärken oder vermindern.

Die Gewichtskraft für ein kugelförmiges Partikel mit der Dichte $\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$, dem Radius $r \text{ [m]}$ und der Erdbeschleunigung $g=9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ kann berechnet werden [125]:

$$F_G = \rho g \pi \frac{4}{3} r^3 \quad (14)$$

Die Gewichtskraft nimmt mit abnehmendem Partikelradius mit der dritten Potenz ab und erreicht bei kleinen Partikeln ($r < 100 \text{ }\mu\text{m}$) nur eine geringe absolute Größe. Sie ist unabhängig vom Abstand der betrachteten Festkörper.

3.1.5 Rechnerischer Vergleich der einzelnen Adhäsionsanteile

Die in Kapitel 3.1 vorgestellten Formeln gelten für das starre Kugel-Platte-Modell mit ideal glatten Oberflächen. Diese idealisierte Annahme macht eine quantitative Absolutrechnung für die Praxis irrelevant, da die realen Partikel Oberflächenrauheiten und eine unregelmäßige Form aufweisen. Sinnvoll ist es hingegen, die Einflussparameter auf die Adhäsionskraft sowie den qualitativen Vergleich der einzelnen Anteile untereinander zu untersuchen. Die Eingangsparameter für die Berechnung der Adhäsionsteile sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Daraus wird sowohl der Einfluss des Abstandes von einem Partikel

zu einer Oberfläche als auch der Einfluss des Partikeldurchmessers auf die einzelnen Anteile der Adhäsionskraft (Abbildung 6, Abbildung 7) ermittelt.

Tabelle 2: Eingangsparameter für den rechnerischen Vergleich der Adhäsionsanteile

Parameter	Angenommene Werte
Partikeldurchmesser	1 μm (variiert*)
Hamakerkonstante H_{132}	$6,7 \cdot 10^{-20}$ [J]
Material 1 (Partikel)	Quarz ($\rho = 2,65$ [g/cm ³])
Material 2 (Platte)	Edelstahl ($\rho = 7,86$ [g/cm ³])
Material 3 (Umgebungsmedium)	Luft mit 65% r. F.
Abstand	variiert ($a_0 = 4$ [Å]*)
γ_{Wasser}	72,8 [mN/m]
ϵ_r	1
ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12}$ [As/Vm]
φ	$1,6 \cdot 10^{-11}$ [As/m ²]

* die in Klammern dargestellten Werte werden für das Beispiel mit variierendem Partikeldurchmesser verwendet.

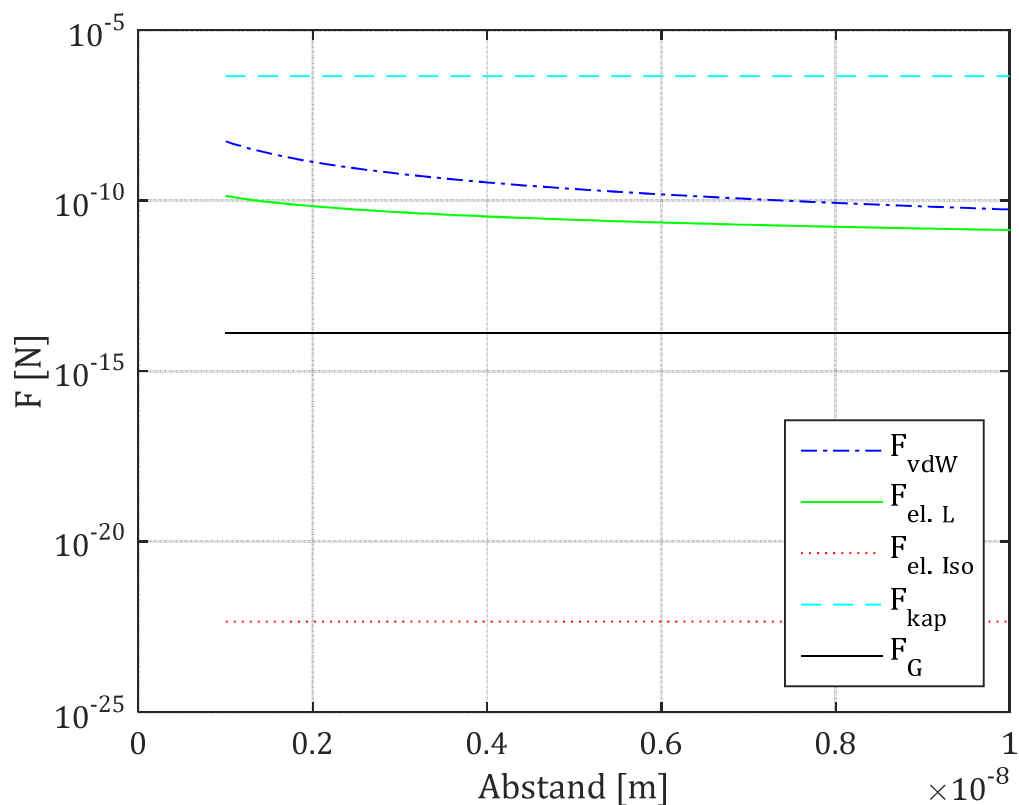


Abbildung 6: Theoretische Adhäsionskräfte verschiedener Bindemechanismen für das ideal starre Kugel-Platte-Modell bei variierendem Abstand von Kugel zu Platte

Die Abbildung 6 zeigt, dass sowohl die Gewichtskraft als auch die Kapillarkraft und die elektrostatische Kraft bei Isolatoren nach der hier betrachteten Modellvorstellung unabhängig vom Abstand des Partikels zur Oberfläche sind. Die van-der-Waals-Kräfte nehmen quadratisch reziprok mit zunehmendem Abstand ab. Der elektrostatische Kraftanteil bei der Adhäsionskraft bei Leitern weist ein linear-reziprokes Verhalten zum Partikel-Wand-

Abstand auf. Für die hier betrachteten Abstände haben die Kapillarkräfte bei den betrachteten Randbedingungen den größten Einfluss, die Gewichtskraft ist aufgrund der geringen Partikelgröße sehr gering und die elektrostatische Kraft bei Isolatoren ist ebenfalls vernachlässigbar.

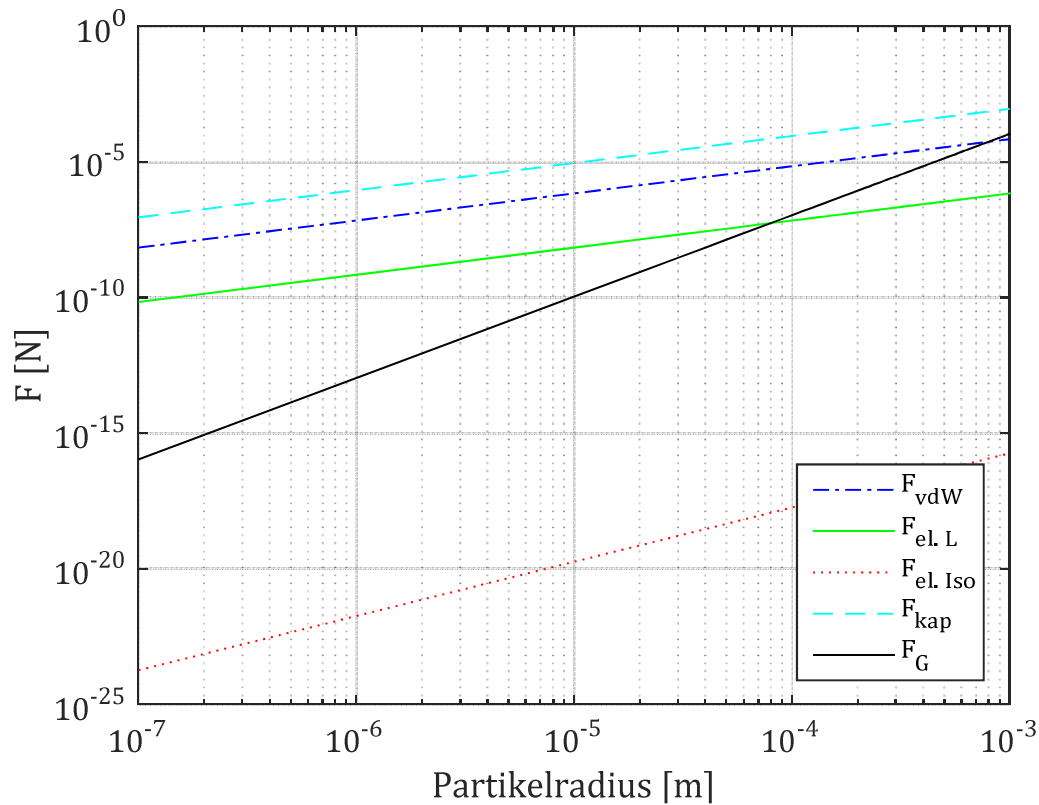


Abbildung 7: Theoretische Adhäsionskräfte verschiedener Bindemechanismen für das ideal starre Kugel-Platte-Modell bei variierendem Kugelradius

Abbildung 7 stellt die Größe der Adhäsionskraftanteile in Abhängigkeit vom Partikelradius bei konstantem Abstand dar. Die Kapillarkraft, die van-der-Waals-Kräfte und die elektrostatischen Kräfte bei Leitern nehmen linear mit dem Partikelradius zu. Die Gewichtskraft nimmt mit der dritten Potenz zu und übersteigt erst bei großen Partikelradien die anderen Kraftanteile. Die elektrostatische Kraft bei Leitern ist sehr gering, nimmt jedoch mit zunehmendem Partikelradius quadratisch zu.

3.2 Adhäsionskraft von Partikeln auf Oberflächen bei nicht idealen Bedingungen

In der Realität liegen im Regelfall keine glatten, starren Partikel und Oberflächen vor [68]. Die Kontaktgeometrie bestimmt wesentlich die Größe der Adhäsionskräfte. Eine Weiterentwicklung der in Kapitel 3.1 vorgestellten Modelle ist daher eine logische Konsequenz.

3.2.1 Rauheitskennwerte

Der Begriff Rauheit bezeichnet die Unebenheit einer Oberfläche. Zur Charakterisierung gibt es verschiedene Kennwerte, welche die Gestaltabweichung beschreiben (siehe Abbildung 8). Im Folgenden wird lediglich auf zwei wesentliche Parameter eingegangen.

Der Rauheitsparameter R_a [μm] bezeichnet den arithmetischen Mittelwert der Beträge der Ordinatenwerte $Z(x)$ [μm] innerhalb einer Einzelmessstrecke l [m] [39]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (15)$$

Der quadratische Mittelwert der Ordinatenwerte innerhalb einer Einzelmessstrecke ist der Parameter R_q [μm]⁴ [39]:

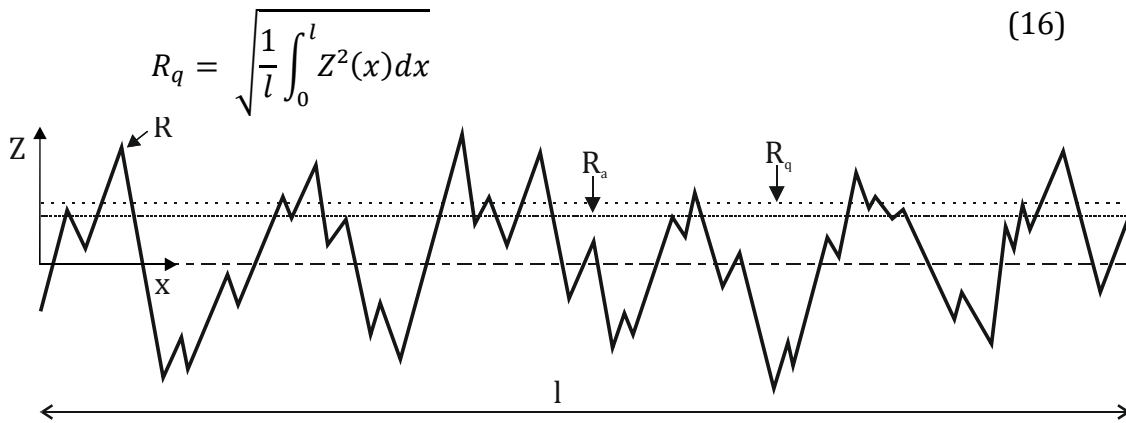
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (16)$$


Abbildung 8: Rauheitskennwerte nach DIN EN ISO 4287

3.2.2 Raues, starres Partikel und glatte, starre Oberfläche

Eine Modifikation der klassischen Modelle wurde erstmalig durch RUMPF erarbeitet, welcher auf die glatte Kugel eine kugelige Rauheitserhebung mit dem Durchmesser x [m] aufsetzt [158]. Der Mittelpunkt der aufgesetzten Kugel befindet sich auf der Partikeloberfläche (siehe Abbildung 9). Die van-der-Waals-Kraft des beschriebenen Systems lässt sich nach Gleichung (17) berechnen.

$$F_{vdw, Rumpf, I} = \frac{H}{12} \left[\frac{x}{a^2} + \frac{d}{(a + \frac{x}{2})^2} \right] \quad (17)$$

Der erste Term in der Klammer beschreibt den Kraftanteil, der durch die Rauheit erzeugt wird, der zweite Term den Einfluss des Partikels selbst. Bei kleinen aufgesetzten Rauheiten auf der Kugel dominiert die Interaktion zwischen Partikel und Oberfläche; je größer die Rauheiten werden, umso größer wird der Abstand zwischen Partikel und Oberfläche. Die van-der-Waals-Kraft wird somit zunächst reduziert. Bei großen Rauheiten überwiegt

⁴ In der englischsprachigen Literatur findet sich für R_q häufig der Begriff *rms* (root mean square average).

die Interaktion zwischen der aufgesetzten Rauheit und der Oberfläche, sodass mit größer werdender Rauheit auch die van-der-Waals-Kräfte größer werden. Die minimale Haftkraft hängt vom vorliegenden System ab. Dies verdeutlicht auch Abbildung 10, welche die van-der-Waals-Kraft in Abhängigkeit vom Rauheitsdurchmesser x bei unterschiedlichen Partikeldurchmessern zeigt (sonstige Parameter sind der Tabelle 2 zu entnehmen).

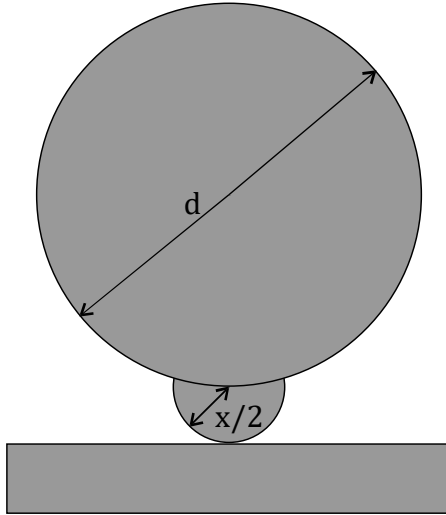


Abbildung 9: Kugel-Platte Haftkraftmodell bei Partikeln mit aufgesetzter Modellrauheit

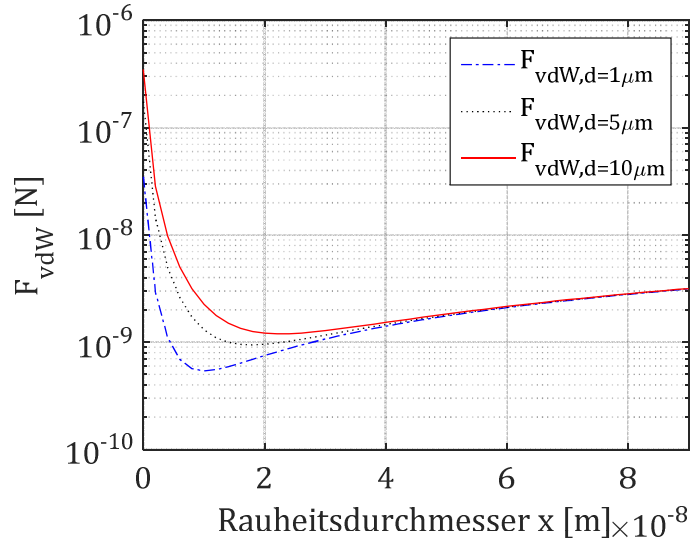


Abbildung 10: Einfluss des Rauheitsdurchmessers auf die van-der-Waals-Kraft zwischen einer rauen Kugel und einer glatten Oberfläche

3.2.3 Raue, starre Oberfläche und glattes, starres Partikel

Weiterhin hat RUMPF ein Modell entwickelt, welches für raue Oberflächen und glatte Partikel die van-der-Waals-Kräfte berechenbar macht [149]. Hierbei interagiert ein kugeliges Partikel mit einer relativ kleinen, halbkugelförmigen Rauheit, die auf einer Oberfläche aufgesetzt ist:

$$F_{vdw, Rumpf, II} = \frac{H}{12a^2} \left[\frac{dx}{x+d} + \frac{d}{(1 + \frac{x}{2a})^2} \right] \quad (18)$$

Hierbei ist H [J] die Hamakerkonstante, d [m] der Partikeldurchmesser, x [m] der Durchmesser der Modellrauheit und a [m] der Abstand zwischen Partikel und Rauheit. Der erste Term in Gleichung (18) beschreibt die Interaktion von Rauheit mit Partikel und der zweite die Interaktion von Partikel und Oberfläche.

Die Gleichungen (17) und (18) beschreiben ähnliche Szenarien (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 11) und führen daher auch zu nahezu gleichen Ergebnissen. Sie sind in Abhängigkeit vom vorliegenden Haftsystem zu verwenden.

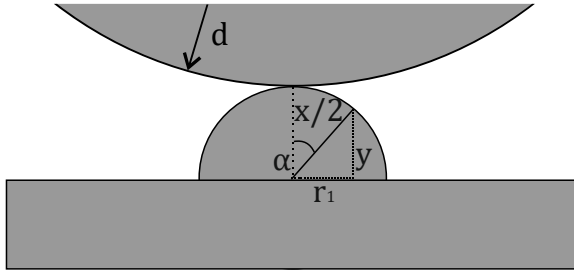


Abbildung 11: Kugel-Platte Haftkraftmodell bei nicht ideal glatter Oberfläche

RABINOVICH ET AL. [149, 150] haben die Gleichung (18) modifiziert, da der Rauheitsdurchmesser messtechnisch schwer erfassbar ist. Sie stellten daher einen idealisierten Zusammenhang zwischen der R_q -Rauheit und dem Rauheitsdurchmesser her ($x=2,97 \cdot R_q$) und implementierten diesen Zusammenhang in das Modell, welches für nanorauhe Oberflächen gilt:

$$F_{vdw, Rabinovich} = \frac{Hd}{12a^2} \left[\frac{1}{1 + \frac{d}{2,97R_q}} + \frac{1}{(1 + \frac{1,485R_q}{a})^2} \right] \quad (19)$$

3.2.4 Deformierbare Kontaktpartner

Unter realen Bedingungen liegen oftmals äußere Kräfte am Kugel-Platte System an (z. B. bei Schüttungen durch aufliegende Partikel), welche die Kontaktpartner verformen. HERTZ [76] berechnete erstmalig die Verformungen und Spannungen für isotrope, glatte Körper aus einem hookeschen Material, wobei vorausgesetzt wird, dass in der Druckfläche ausschließliche Normalspannungen wirken. Die elastische Deformation der beiden Kontaktpartner führt zu einer runden Kontaktfläche mit dem Radius b [m]. Dieser lässt sich nach Gleichung (20) berechnen und ist von der Querdehnzahl ν [-] und der Elastizitätsmoduln E [N/mm²] der Kontaktpartner sowie vom Radius der Kugel r [m] abhängig [16, 76, 82]:

$$b = \sqrt[3]{\frac{3Fr}{4} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)} \quad (20)$$

Die maximale Normalspannung σ_{max} [N/mm²] entsteht im Zentrum des Kontaktkreises und fällt am äußeren Rand der Druckfigur auf 0 [N/mm²] ab [76]:

$$\sigma_{max} = \frac{3F}{2\pi b^2} \quad (21)$$

Bei elastischer Verformung des Partikels ist keine wesentliche Vergrößerung der Trennkraft zu erwarten [159]. Die bei der elastischen Deformation auftretende Kontaktfläche reduziert sich bei der Entlastung wieder auf einen Kontaktpunkt, sodass lediglich im permanent deformierten Zustand aufgrund der größeren Kontaktfläche mit einer Adhäsions-

kraftzunahme zu rechnen ist. Die plastische Verformung in der Kontaktzone tritt auf, sobald die vorherrschende Spannung σ die Fließgrenze des Materials übersteigt. In diesem Fall wird für die van-der-Waals-Kraft das Kugel-Platte-Modell mit einem Platte-Platte-Modell kombiniert und nach Gleichung (22) näherungsweise berechnet.

$$F_{vdw,deformiert} = \frac{Hd}{12a_0^2} + \frac{Hb^2}{6a_0^3} \quad (22)$$

Es hat sich gezeigt, dass die genannten Zusammenhänge für geringe Lasten nicht gelten [94]. Diverse Weiterentwicklungen der Theorie waren die Folge.

JOHNSON, KENDALL und ROBERTS (JKR) [88] berücksichtigen beim Kontakt einer elastischen Kugel mit einer glatten Platte auch die adhäsiven Kräfte innerhalb der Kontaktfläche. Sie entwickelten die Theorie nach HERTZ für niedrige Lasten weiter und ermittelten die Adhäsionskraft wie folgt:

$$F_{JKR} = 3\gamma\pi r \quad (23)$$

Hierbei ist γ [N/m] die freie Oberflächenenergie (mit $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$), welche als Materialkonstante die Haftkraft zwischen den Körpern maßgeblich beeinflusst. Die freie Oberflächenenergie γ ist ein Maß für die Energie je Flächeneinheit, die benötigt wird, um die Oberfläche eines Festkörpers zu vergrößern [203]. Das Elastizitätsmodul der Kontaktpartner wird an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.

DERJAGUIN, MULLER und TOPOROV (DMT) [37] entwickelten ebenfalls die Theorie von HERTZ weiter, wobei molekulare Anziehungskräfte lediglich in einem Ring außerhalb der Kontaktzone wirken, jedoch keine Deformation der Körper hervorrufen.

$$F_{DMT} = 4\gamma\pi r \quad (24)$$

TABOR [194] stellte fest, dass die widersprüchlich erscheinenden Theorien zwei Spezialfälle darstellen, die durch einen dimensionslosen Parameter⁵ charakterisiert werden können. Die Anwendung der JKR-Theorie (Gleichung (23)) ist demnach auf große weiche Kontaktpartner mit großer Adhäsion limitiert, wohingegen die DMT-Theorie (Gleichung (24)) bei kleinen steifen Kugeln mit geringer Adhäsion Anwendung findet [87, 145].

Weitere Theorien zum Kontakt von Körpern wurden u. a. von MAUGIS [124] und BRADLEY [20] entwickelt.

Werden die Adhäsionskräfte experimentell bestimmt, so liegen diese häufig unterhalb der JKR- und der DMT-Theorie [43, 63]; dies ist u. a. auf den Einfluss der Rauheit zurück zu führen.

⁵ Dieser Parameter berücksichtigt u. a. das Elastizitätsmodul der Kontaktpartner.

3.3 Modelle zur Partikelablösung

Ist ein Partikel in Kontakt mit einer Oberfläche, bilden sich Adhäsionskräfte aus (vgl. Kapitel 3.1). Die Partikelablösung von der Oberfläche ist möglich, wenn die extern angreifenden Kräfte die Adhäsionskräfte zwischen Partikel und Oberfläche übersteigen. Wenn eine tangential Beanspruchung vorliegt, ist auch die Festkörperreibung, die in der Kontaktzone zwischen Partikel und Oberfläche auftritt, relevant. Demzufolge sind in Abhängigkeit von der Art der extern applizierten Kraft verschiedene Mechanismen zur Initiierung der Partikelbewegung denkbar [206].

Es werden drei Fälle der Partikelablösung von Oberflächen unterschieden [81]:

- I. Abheben: Überwindung der Adhäsionskräfte nach Gleichung (1) in Normalrichtung.
- II. Gleiten: Überwindung der Adhäsionskräfte parallel zur Oberfläche; die statische Reibungskraft F_S [N] muss überwunden werden, um eine Partikelbewegung zu initiieren. Vereinfacht wird oftmals folgender Zusammenhang angenommen:

$$F_S = \mu_S F_{adh} \quad (25)$$

Gemäß Gl. (25) sind die normal zur Oberfläche wirkenden Kräfte⁶ F_{adh} [N] sowie ein statischer Reibkoeffizient μ_S [-] die Parameter, die die statische Reibung determinieren.

Die Gleitreibung F_R [N] wird nach der Überwindung der Reibungskraft F_S benötigt, um das Partikel in Bewegung zu halten.

$$F_R = \mu_k F_{adh} \quad (26)$$

Hierbei ist der kinematische Reibkoeffizient μ_k [-] sowie die senkrecht zur Oberfläche wirkenden Kräfte F_{adh} [N].

- III. Rollen: Das äußere Moment übersteigt das innere Moment, welches durch Adhäsion induziert wird; HEIM ET. AL [75] konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass Rollreibung und Adhäsionskräfte bei Mikropartikeln (Partikeldurchmesser 1-5 μm) direkt miteinander korrelieren.

Ein Überblick über die Ablösemechanismen ist in Abbildung 12 gegeben.

⁶ In diesem Fall wird ein unbelastetes Partikel betrachtet. Bei einer orthogonal zur Oberfläche extern angreifenden Kraft ist diese zusätzlich zu berücksichtigen.

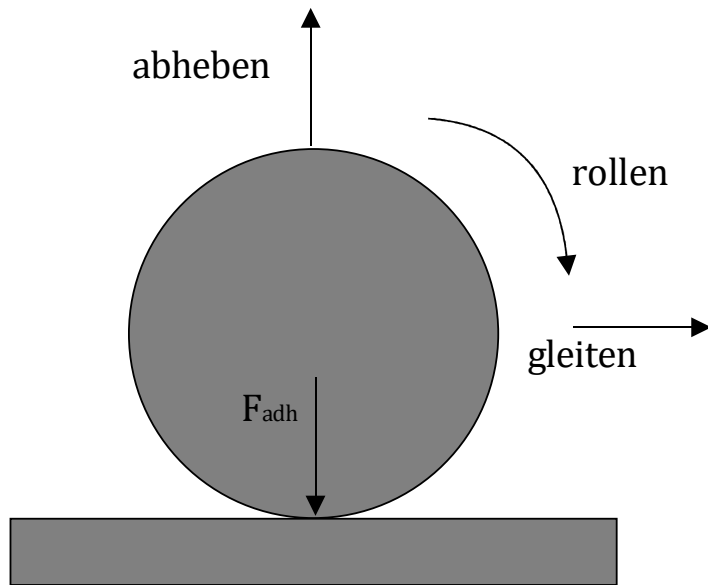


Abbildung 12: *Partikelablösemechanismen*

4 Grundlagen der Reinigung

4.1 Definitionen

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Begrifflichkeiten sollen zunächst definiert werden:

Der Begriff *Reinigung* beschreibt einen Prozess, der das Ziel der dauerhaften und möglichst vollständigen Trennung von mindestens zwei Substanzen verfolgt. Zur Reinigung müssen die wechselwirkenden Kräfte zwischen Feststoffoberfläche und Kontamination überwunden werden. Bei vollständiger Reinigung liegt eine *reine* Oberfläche vor. Im Rahmen dieser Arbeit werden Festkörper (Substrat, Probenoberfläche) und kontaminierende Substanzen betrachtet.

Reinigungsversuche werden zum Nachweis der Effektivität eines Reinigungsvorganges durchgeführt. Sie sind abhängig von der Reinigungsmethode und der Kontamination des jeweiligen Anwendungsfalles.

Die *Reinigbarkeit* beurteilt die Fähigkeit von Feststoffoberflächen, bei dem gewählten Reinigungsverfahren die Entfernung von Kontaminationen zu unterstützen. Sie wird in *Reinigungsversuchen* unter standardisierten und reproduzierbaren Bedingungen mit Modellkontaminationen untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit werden *Partikel* verwendet, welche als einzeln vorliegende, feste, inerte Teilchen definiert sind und das Größenspektrum der im Krankenhaus relevanten Kontaminationen abdecken.

Es werden zwei grundlegende Reinigungssysteme unterschieden: Die Reinigung im *immergierten System* findet in geschlossenen Systemen bei vollständig von Flüssigkeit benetzten Oberflächen statt (2-Phasen-System i. d. R. mit flüssiger und fester Phase), wohingegen im *nicht-immergierten System* keine vollständige Benetzung der zu reinigenden Feststoffoberflächen gegeben ist (3-Phasen-System mit gasförmiger, flüssiger und fester Phase).

Es ist davon auszugehen, dass im immergierten und im nicht-immergierten System unterschiedliche Reinigungsmechanismen wirken [123]. Umfangreichere Versuchsergebnisse liegen im immergierten System vor. Eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse vom immergierten ins nicht-immergierte System soll im Rahmen von eigenen Versuchen untersucht werden.

4.2 Kontaminationen im Krankenhaus

Die Art und die Eigenschaften der Kontamination bestimmen wesentlich den Reinigungsprozess. Es ist daher unabdingbar, zunächst die im Krankenhaus relevanten Verschmutzungsarten zu kategorisieren und deren mögliche Ursachen zu identifizieren.

Partikuläre Kontaminationen können über die Luft oder andere Medien ins Krankenhaus eingetragen werden und sich anschließend auf Oberflächen ablagern. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass sie von Personen ausgehen oder durch mechanischen Abrieb

an Geräten oder innerhalb von Prozessen entstehen [99]. Die Partikel unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Form, Größe, chemischen Zusammensetzung und ihren Eigenschaften [53].

Hausstaub sind runde, eckige oder faserförmige Partikel, die sich in niedergeschlagener oder in Luft suspendierter Form im Innenraum wiederfinden. Die Feststoffe sind dabei sowohl anorganische (z. B. Silikate oder Eisen [162]) als auch organische (z. B. Viren, Bakterien [70] oder Pilze [51, 98]) Materialien im Submillimeterbereich, welche nicht weiter aufgelöst werden können [176].

Die im Hausstaub enthaltenen Komponenten haben oftmals negative Auswirkungen auf die Gesundheit [140]. Hierbei ist der direkte Kontakt zum Menschen inhalativ (über die Luft), oral (i. W. über Nahrung) und dermal (über Hautkontakt) möglich [176].

Alle mikrobiologischen Kontaminationen können im Krankenhaus zu einem Nosokomial-Erreger werden. Sie können in drei Gruppen spezifiziert werden:

- I. Viren: weisen eine Größe von 20 bis 100 nm auf [28]. Zur Vermehrung von Viren wird eine Wirtszelle benötigt, welche wiederum abstirbt. Viren wirken bereits in sehr geringen Mengen pathogen. Oftmals haften Viren an größeren Partikeln.
- II. Pilze und Hefen: bestehen größtenteils aus einem Geflecht feinsten fadenförmiger Zellen, wobei die sogenannten septierten Hyphen einen Durchmesser von etwa 5 µm aufweisen [28]. Hefen gehören zu den einzelligen und somit höheren Pilzen.
- III. Bakterien: können in unterschiedlichen morphologischen Formen (z. B. Kugel-, Stäbchen- oder Schraubenform) auftreten und sind i. d. R. 0,5 µm bis 10 µm groß [100].

Neben den eben beschriebenen partikulären Kontaminationen besteht die Möglichkeit der kohäsiven Verschmutzung. Diese kann je nach Viskosität oder dem Verhalten (löslich, quellbar, emulgierbar) der Kontamination noch weiter unterteilt werden [45, 52]. Zu den kohäsiven Kontaminationen gehören z. B. Biofilme, welche nach der Initialadhäsion eines Bakteriums auf einem Substrat wachsen können [129]. Im Krankenhaus treten Biofilme aufgrund der häufigen Reinigungsintervalle planmäßig nicht auf, sodass im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich partikuläre Kontaminationen berücksichtigt werden.

4.3 Stand der Forschung hinsichtlich der Reinigungsmechanismen sowie bisher durchgeführte Untersuchungen zur Reinigung und Reinigbarkeit

4.3.1 Reinigungsmechanismen

SINNER [179] erarbeitete die Grundlage der Wirkmechanismen von Reinigungsprozessen im immmergierten System (2-Phasen-System bestehend aus Feststoff und Fluid). Der Sinnersche Kreis geht davon aus, dass *Zeit*, *Chemie*, *Mechanik* und *Temperatur* die wesentlichen Faktoren sind, die den Reinigungserfolg im immmergierten System beeinflussen und in Abhängigkeit voneinander stehen. WILDBRETT [214]

Das erste Ficksche Gesetz (Gl. (27)) beschreibt den stationären Prozess, der einen thermodynamisch ungünstigen Zustand mit einem Konzentrationsgefälle ausgleicht. Hierbei ist die Teilchenstromdichte J [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] definiert als die Stoffmenge m der Atome, die je Zeiteinheit t [s] durch eine vertikale zur Stoffstromrichtung ausgerichtete Flächeneinheit A [m^2] diffundiert. Diese entspricht in x-Richtung dem Produkt aus dem Diffusionskoeffizienten D [m^2/s] und dem Konzentrationsgradienten $\partial c / \partial x$ (eindimensionaler Transport).

Das zweite Ficksche Gesetz (Gl. (28)) ermöglicht die Beschreibung der instationären Diffusion und sagt aus, dass die Diffusion umso schneller erfolgt, je stärker der Konzentrationsgradient ausgeprägt ist:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (28)$$

4.3.2 Untersuchungen im immmergierten System

SAIKHWAN ET AL. [161] reinigten mit einer Flüssigkeit Tomatenpaste von reinem und beschichtetem Edelstahl ($R_a=0,072-0,7 \mu\text{m}$, freie Oberflächenenergie $\gamma_s=15,5-54,1 \text{ mN/m}$) ab. Bei der Abreinigung des kohäsiven Schmutzfilmes wurde keine signifikante Abhängigkeit des Reinigungserfolges von der Rauheit festgestellt. Die Anhaftung der Kontamination an der Oberfläche wurde in diesem Versuch wesentlich über die freie Oberflächenenergie bestimmt. BOBE [14] reinigte in einer Strömungszelle kohäsive Schmutzfilme von Edelstahl ($R_a=0,1-2 \mu\text{m}$) ab. Er kam hingegen zu dem Ergebnis, dass eine hohe Rauheit einen negativen Einfluss auf das Reinigungsergebnis hat. Diese beiden Studien verwendeten ungleiche kohäsive Schmutzfilme, die daher ein unterschiedliches Abreinigungsverhalten aufweisen könnten. Dies lässt den Schluss zu, dass die Art der Kontamination (z. B. Oberflächenladung) wesentlich das Abreinigungsverhalten an einer Oberfläche bestimmt und stützt somit diese These der Einflussfaktoren des erweiterten Sinnerschen Kreises. In weiteren Untersuchungen konnte BOBE keinen eindeutigen Einfluss der Rauheit auf das Reinigungsergebnis bei partikulärer Kontamination in einer Strömungszelle feststellen.

SCHLÜSSLER [165] führte Reinigungsversuche mit kohäsiven Eiweißkontaminationen auf Glas- und Metalloberflächen durch, welche im immmergierten System entfernt wurden. Zusammenhänge von der Reinigungslösung (Konzentration, Zusammensetzung), deren Temperatur, der Kontamination (Art, Zustand und Menge) und der Reinigungsgeschwindigkeit wurden identifiziert. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Reinigungsgeschwindigkeiten an verschiedenen nicht näher charakterisierten Materialoberflächen festgestellt. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Oberflächeneigenschaften und der Werkstoff den Reinigungsprozess und die Reinigbarkeit der Probe wesentlich beeinflussen.

HOFMANN [80] experimentierte mit Proteinkontaminationen in Edelstahlrohren und analysierte den Stoffübergang als Maß der Reinigbarkeit. SCHÖLER [168] untersuchte die

Reinigung gerader und komplexer (Rohr-) Geometrien mit einer kohäsiven Stärke-Zinksulfidmatrix. Ihm gelang die Erklärung des zeitlichen Ablaufes der Reinigung über strömungsmechanische und diffusive Ansätze. Die Reinigbarkeit der Rohre in Abhängigkeit von deren Oberflächeneigenschaften wurde nicht näher untersucht. Weitere Untersuchungen zu viskosen Kontaminationen in Rohrströmungen wurden von diversen Autoren (u. a. [62, 209, 217]) durchgeführt. Ein Überblick über die bei der Reinigung ablaufende Kinetik insbesondere in Abhängigkeit von den Reinigungsmitteln wird in THOR ET AL. [196] gegeben.

HOFFMANN und REUTER [78] untersuchten Sporenkontaminationen in einem eingebrannten Proteinfilm auf Edelstahloberflächen ($R_a \approx 0,5\text{--}6\text{ }\mu\text{m}$). Sie stellten einen linearen Zusammenhang zwischen der Restkontamination nach der Reinigung in einem Rohrkreislauf und der Rauheit fest.

WEIGL [208] untersuchte den Rückstand von Glaskugeln und Hefezellen nach der Reinigung im Strömungskanal. Er konnte keinen signifikanten Unterschied bei der Reinigbarkeit von Edelstahloberflächen in Abhängigkeit von der Topographie feststellen. Dies konnte durch BOBE [14] bestätigt werden. Jedoch zeigte WEIGL Tendenzen auf, dass Oberflächen in Schleifrichtung und somit entlang geringer Linienrauheiten tendenziell besser reinigbar sind als orthogonal zur Schleifrichtung gereinigte Oberflächen ($R_a = 0,2\text{--}6\text{ }\mu\text{m}^7$). Er zeigte weiterhin ein unterschiedliches Abreinigungsverhalten von der aufgebrauchten mechanischen Reinigungseinwirkung (Volumenstrom bzw. hydrodynamische Kraft) sowie den verwendeten Kontaminationen auf.

LECLERCQ-PERLAT und LALANDE [108] haben u. a. Versuche mit Sporen auf Edelstahl, Glas, Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polyvinylidenfluorid (PVDF) durchgeführt ($R_a = 0,11\text{--}0,3\text{ }\mu\text{m}$, $\vartheta = 45\text{--}58^\circ$). Die partikuläre Kontamination wurde in einem immergierten System abgereinigt; DÜRR [44] wertete die Versuche aus und zeigte, dass sich tendenziell eine hohe Rauheit und ein niedriger Benetzungswinkel negativ auf die Reinigbarkeit auswirken.

Neben den genannten kontinuierlichen Reinigungsversuchen wurden von verschiedenen Autoren (z. B. [4, 11, 12, 15, 61]) auch pulsierende Strömungen untersucht.

4.3.3 Untersuchungen im nicht-immergierten System

STÖHR ET AL. [189] führten Reinigungsversuche im Scheuer-Wisch-Verfahren mit kohäsiven Kontaminationen (künstlich hergestellter Talg) an Glas- und Polycarbonatproben durch. Sie zeigten, dass der Anpressdruck und die Reinigungsintensität den Reinigungserfolg beeinflussen. Oberflächeneigenschaften wurden im Rahmen der Versuche nicht näher betrachtet.

MÄÄTTÄ [117], MÄÄTTÄ ET AL. [118, 119] und PESONEN-LEINONEN [140] untersuchten die Reinigbarkeit von Keramikfliesen, Polyvinylchlorid (PVC)-Proben, Beton (beschichtet

⁷ Bei den Rauheitsangaben handelt es sich um Flächenrauheiten, die Unterscheidung in und entgegen der Schleifrichtung wurde nicht vorgenommen.

und unbeschichtet) bei rotierenden Reinigungsbewegungen. Es konnte gezeigt werden, dass bei verschiedenen kohäsiven Schmutzfilmen aus dem agrikulturellen Bereich und nicht näher spezifizierten partikulären Kontaminationen eine eingeprägte Mikrostruktur (Topographie) und der Anteil der Weichmacher in PVC-Proben sowie Beschichtungen die Reinigbarkeit der Proben beeinflussen. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Rauheit und der Reinigbarkeit wurde mit den ausgewählten Reinigungsmethoden nicht festgestellt. Der Benetzungswinkel konnte jedoch als signifikanter Einflussfaktor identifiziert werden. Grundsätzlich ließen sich kohäsive Kontaminationen schlechter abreinigen als Partikel. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Grenzfläche zwischen Kontamination und zu reinigender Oberfläche den Reinigungserfolg wesentlich beeinflusst. Die geringe Kontaktfläche zwischen Partikeln und Feststoffoberflächen bedingt geringere adhäsive Kräfte als bei flächigem Kontakt wie bei kohäsiven Schmutzschichten und resultiert somit in einer verbesserten Reinigbarkeit für Erstere.

GERHARDS und SCHMID [57] untersuchten die Sprühreinigung von Edelstählen unterschiedlicher Rauheit ($R_a=0,2-0,8\text{ }\mu\text{m}$) mit kohäsiven Stärke- und Proteinkontaminationen. Der Einfluss der Oberflächeneigenschaften oder des Materials konnte nicht festgestellt werden.

METTLER und CARPENTIER [126] untersuchten einen maschinellen Reinigungsprozess an mit Biofilmen kontaminierten Polyurethan-Proben von Bodenbelägen. Die Restkontamination nach der Reinigung, ausgedrückt als Lebendzellzahl im Biofilm (Koloniebildende Einheit, KBE), wurde an jeder Probe evaluiert. Die Reinigbarkeit der Proben konnte mit der Rauheit in Zusammenhang gebracht werden.

SCOTT ET AL. [175] entwickelten einen Prüfstand für Reinigungsversuche im nicht-immersierten System mittels Flüssigkeitsstrahlen und untersuchten Prozessparameter bei der Reinigung. MAUERMANN [122] analysierte orts- und zeitaufgelöst den Reinigungsverlauf mittels Flüssigkeitsstrahlen. Die Reinigungsprozesse, die bei der Entfernung einer kohäsiven Kontamination (verkleisterter Kartoffelstärke mit Uranin) vorherrschen, wurden in Abhängigkeit von verschiedenen Prozessparametern (Düsendurchmesser, -abstand, Einwirkzeit und Strahlaufprallwinkel) untersucht.

KELLER ET AL. [93] führten einen einem manuellen Wischvorgang nachempfundene Reinigungsprozess an Edelstahl, Aluminium und verschiedenen Polymeroberflächen ($R_a=0,2-4,5\text{ }\mu\text{m}$) durch. Bei der Abreinigung von Partikeln konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Rauheit und der zurückgebliebenen Restpartikelmenge festgestellt werden. Die Ergebnisse wurden integral über verschiedene Materialgruppen erzielt; neben verschiedenen Rauheitsparametern wurden keine weiteren Oberflächeneigenschaften erfasst. Die verwendete direkte Auswertemethode erfasste Partikel mit einem sphärischen Äquivalentdurchmesser von $d\geq 5\text{ }\mu\text{m}$. Von weiteren Autoren konnte außerdem gezeigt werden, dass die Materialien (Reinigungstuch) und Prozesse, die bei der Reinigung verwendet werden, grundsätzlich das Reinigungsergebnis beeinflussen [30, 105, 106].

Zudem beschäftigen sich zahlreiche Arbeiten mit dem (qualitativen) Einfluss der insitu-Reinigung auf die Erregeranzahl und den dazugehörigen mikrobiellen Auswertemethoden [58, 96, 116, 121, 213].

4.3.4 Zusammenfassung und Defizitanalyse

Der in den Kapiteln 4.3.2 und 4.3.3 gezeigte Stand der Erkenntnisse hinsichtlich der Reinigung und Reinigbarkeit zeigt, dass bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt wurden. Insbesondere im immmergierten System konnten viele Messungen sowohl mit partikulären als auch mit kohäsiven Kontaminationen ausgewertet werden. Eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus dem immmergierten ins nicht-immmergierte System ist anzuzweifeln, da im flüssigen System andere Wechselwirkungen zwischen der Kontamination und der Oberfläche vorherrschen. Hierbei resultieren wesentliche Unterschiede aus der Abwesenheit der Kapillarkräfte und dem Vorhandensein hydrodynamischer Kräfte beim Abreinigen von Kontaminationen im immmergierten System.

Die Vergleichbarkeit der vorgestellten Studien ist in Frage zu stellen, da weder die gleichen Reinigungsprozesse und Kontaminationen in den Versuchen verwendet noch die gleichen Oberflächeneigenschaften erfasst und zur Auswertung herangezogen wurden. Bisher ist festzustellen, dass die Art der Kontamination (i. W. kohäsiv oder partikulär [14]) die auf den Reinigungsprozess Einfluss nehmenden Parameter dominiert. Für die immmergierten Systeme wurde eine Reinigungskinetik identifiziert; hinsichtlich der bei der Reinigung im nicht-immmergierten System ablaufenden Mechanismen besteht noch Forschungsbedarf. Hierbei wurde insbesondere die Reinigung bei partikulären Kontaminationen bisher nur wenig betrachtet. Systematische Untersuchungen der Reinigbarkeit von Oberflächen in Abhängigkeit ihrer Oberflächeneigenschaften sowie wesentliche Prozessparameter bei der Scheuer-Wisch-Reinigung fehlen bisher. Ob ein Zusammenhang zwischen der Reinigbarkeit einer Oberfläche und den prävalenten Adhäsionskräften besteht, ist noch festzustellen. Der Stand des Wissens soll daher mit den Experimenten, die in den Kapiteln 6 und 7 vorgestellt werden, systematisch erweitert werden.

4.4 Verfahren zur Prüfung der Partikelreinheit von Oberflächen

Zur Bestimmung der partikulären Oberflächenreinheit stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Die Verfahren werden oftmals zur Qualitätskontrolle oder zur Fertigungsüberwachung genutzt. Direkte Verfahren erlauben die Detektion der Partikel auf der Oberfläche, indirekte Verfahren hingegen erfordern zunächst eine Probennahme (Überführung auf ein Ersatzsubstrat / in ein Ersatzmedium), um anschließend ein Auszählen der Partikel zu ermöglichen.

Direkte Methoden

Eine visuelle Begutachtung ermöglicht die qualitative Beurteilung stark kontaminierter Oberflächen (ca. $4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ [22, 27]). Werden Hilfsmittel wie externe Lichtquellen, Lupen o. Ä. eingesetzt, reduziert sich die Sichtbarkeitsgrenze und auch feine einzelne Partikel $d > 25 \mu\text{m}$ können erfasst werden [2, 38, 204].

Bei der optischen Mikroskopie wird die zu prüfende Oberfläche unter das Mikroskop gelegt bzw. das Mikroskop wird auf das zu untersuchende Bauteil aufgesetzt. Das Messprinzip ist automatisierbar, wenn optisch glatte Oberflächen vorliegen und ein starker Kontrast zwischen partikulärer Kontamination und Oberfläche gegeben ist; das Verfahren eignet sich jedoch ausschließlich für kleines und gut zugängliches Prüfgut [167].

Für die Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop (REM) wird die zu untersuchende Probe in eine Vakuumkammer eingebracht und die Abmessung der Partikel mithilfe des Längenmaßstabes des REMs festgestellt [99]. Eine automatisierte Auszählung der vorliegenden Partikel ist bei hinreichend guten Kontrasten möglich. Die zu untersuchende Probengröße ist jedoch geometrisch stark begrenzt. Eine vergleichbare Auswertung ist von mittels Rasterkraftmikroskop⁸ (AFM, engl. Atomic Force Microscope) ermittelten Aufnahmen möglich [38].

Streif- und Streulichtmessgeräte beleuchten die zu untersuchenden Prüfstellen in einem flachen Winkel. Wird die Oberfläche beleuchtet, reflektiert das meiste Licht und gelangt nicht in die oberhalb angeordnete Kamera. Die Oberfläche erscheint dadurch dunkel. Befindet sich ein Partikel auf der Oberfläche, so wird dieser durch das Streiflicht erfasst, reflektiert das Licht in alle Raumrichtungen und das Streulicht wird detektiert und kann zur Partikelgrößenanalyse verwendet werden. Die technische/raue Oberfläche wird ausgeblendet und Kontaminationen treten hervor. Mittels Bildverarbeitung können so sogar sehr feine Partikel ($d > 0,5 \mu\text{m}$) erfasst werden [167, 177]. Bei technischen Oberflächen werden jedoch nur Partikel detektiert, die über die Oberflächenstruktur hinausragen.

In Krankenhäusern erfolgt eine insitu Überprüfung des Kontaminationsgrades von Oberflächen beispielsweise durch Abstriche, Abklatschproben, Anfärben oder ATP-Bestimmung [29, 32, 33, 113]. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um ein Verfahren zur Überprüfung der Partikelreinheit, sondern um eine Bewertung, mit der wiederum auf den mikrobiologischen Kontaminationsgrad geschlossen wird.

Indirekte Methoden

Gravimetrische Methoden ermöglichen die indirekte Bestimmung der Partikelmasse auf einer Oberfläche über eine Differenzwägung. Hierzu wird die Masse eines Analysefilters vor und nach der Filtration und Trocknung mit der Spülflüssigkeit mit einer Präzisionswaage ermittelt [38, 166]. Eine Aussage über die Partikelgrößenverteilung oder -anzahl ist nicht möglich.

Beim Tape-Lift-Verfahren werden aufzuzeichnende Partikel mithilfe eines sauberen adhäsiven Ersatzsubstrats abgelöst und in den Messprozess (z. B. Lichtmikroskopie) überführt [164].

Eine weitere Möglichkeit zu detektierenden Partikel von der Originaloberfläche abzulösen besteht, wenn diese zunächst mithilfe eines sauberen Spülmediums abgetrennt und

⁸ Die Funktionsweise eines AFMs wird in Kapitel 5.1.5 erläutert.

anschließend im Messmedium unter Anwendung von geeigneten Messgeräten/-verfahren (z. B. Flüssigpartikelzähler, Laser-induzierte Breakdown Detektion, Dynamische Lichtstreuung, Rasterelektronenmikroskopie) untersucht werden [36, 99]. Die Partikel können auch mithilfe von Messsonden und Druckluft in den Schwebezustand überführt und anschließend in einen Luftpartikelzähler eingesaugt werden. Standardisierte Luftpartikelzähler sind für Partikelgrößen $0,1 \mu\text{m} < d < 25 \mu\text{m}$ geeignet [164]. Eine Übersicht über weitere Partikelmessverfahren wird u. a. in [53] gegeben.

Grundsätzlich ist bei indirekten Verfahren zu beachten, dass die Möglichkeit besteht, dass bei der Probennahme nicht alle Partikel von der Oberfläche abgelöst werden und ein geringerer Messwirkungsgrad resultiert. Eine Plausibilitätskontrolle der Messergebnisse ist zwingend erforderlich.

5 Methoden, Material und Programm der eigenen Versuche

Die Methoden, die im Rahmen der eigenen Versuche angewendet werden um sowohl die Feststoffoberflächen als auch Partikelsysteme zu charakterisieren, werden im folgenden Kapitel zunächst vorgestellt. Ferner werden die an den Materialien erzielten Ergebnisse dargestellt. Als Feststoffoberflächen dienen primär Materialien, die in Krankenhäusern standardmäßig eingesetzt werden (Edelstahl, Polymere, Beschichtungen etc.) und ergänzend Material, dessen Oberflächeneigenschaften chemisch homogen und definiert einstellbar sind (Silizium). Als Kontaminationen kommen verschiedene inerte Partikelsysteme zum Einsatz. Anschließend werden die Versuchsaufbauten für die Einzelpartikelversuche (Adhäsionskraftmessungen mit dem AFM), die Versuche mit Partikelkollektiven (Reinigungsversuche) und die Experimente zur Persistenz von Mikroorganismen auf charakterisierten Feststoffoberflächen beschrieben. Schließlich wird das Versuchsprogramm vorgestellt.

5.1 Methoden zur Charakterisierung der partikulären Ausgangskontamination und der Feststoffoberflächen

5.1.1 Partikelgrößenverteilung mittels Laserbeugung

Die Partikelgrößenverteilung der verwendeten Kontaminationen wird mithilfe der Laserbeugung ermittelt. Für die hier verwendeten Partikelsysteme kommt das Partikelgrößenmessgerät HELOS (Fa. Sympatec, Clausthal-Zellerfeld) mit den Linsen R1, R3 und R5 zum Einsatz. Das Grundprinzip dieser Messung ist in Abbildung 14 dargestellt. Ein aufgeweiteter HeNe-Laserstrahl trifft auf die in Wasser suspendierten Partikel. Um möglichst ausschließlich Primärpartikel zu messen und Agglomerate zu separieren, werden die untersuchten Partikelsysteme eingangs für 20 Sekunden mit Ultraschall vorbehandelt. Beim Zusammentreffen von Laserstrahl und Partikel wird der Strahl abgeschwächt und teilweise gebeugt. Es entsteht eine Beugungslichtverteilung, die aus der Summe der gebeugten Intensitäten aller Teilchen im Strahl besteht. In der Übertragungslinse wird das gebeugte und abgeschwächte Licht fokussiert und auf einen ringförmigen Detektor in der Brennebene geleitet. Die Lichtintensität sowie die Abstände zwischen den Ringen sind abhängig von der Partikelgröße, da die partikelspezifischen Beugungswinkel θ [°] auf den gleichen Radien auf dem Detektor abgebildet werden. Über die Intensitätsverteilung kann die Berechnung der Partikelgrößenverteilung⁹ erfolgen [111, 114, 186, 192].

⁹ Bei nicht ideal runden Partikeln wird der aus dem Äquivalentkreis abgeleitete Durchmesser verwendet.

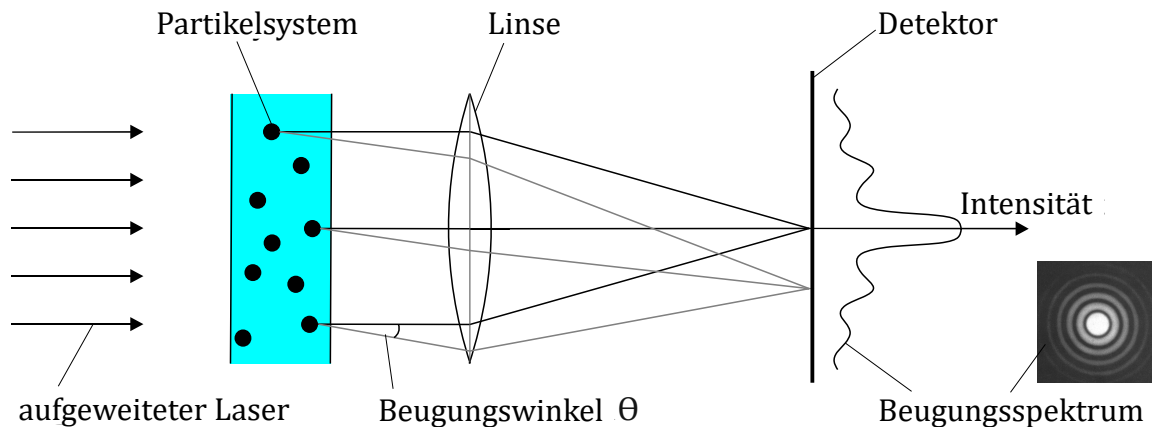


Abbildung 14: Prinzip der Laserbeugung

5.1.2 Partikelcharakterisierung mittels Rasterelektronenmikroskopie

Die Partikelkollektive wurden hinsichtlich ihrer Anordnung und Partikelform auf ausgewählten Feststoffoberflächen sowohl vor als auch nach dem Reinigungsvorgang untersucht. Hierfür wurden die Proben zunächst mit Gold besputtert, um eine Fixierung des jeweiligen Zustands zu erreichen. Die Aufnahmen wurden mit Rasterelektronenmikroskopen (REM, JSM-6700F und JSM-5510 LV, Fa. JEOL, Freising) durchgeführt. Proben vor der Reinigung wurden im Niedrigvakuum mit dem JSM-5510 LV bei einer Spannung von 15 kV im Sekundärelektronenmodus gemessen. Bereits gereinigte Proben wurden im Hochvakuum (ca. $10E-04\text{Pa}$) mit dem JSM-6700F bei einer Spannung von 5 kV gemessen. Aufgrund der elektrischen Aufladung der Probe wurden die Aufnahmen im Rückstreu-elektronenmodus im „Composition Mode“ (COMPO) gemacht.

5.1.3 Freie Oberflächenenergie der Partikel mittels inv. Gaschromatographie

Die freie Oberflächenenergie ist die Energie, die frei wird, wenn die Oberfläche eines Feststoffs mit einem anderen Stoff belegt wird. Um diese zu messen, werden die Partikelsysteme zunächst in eine zylindrische Säule gefüllt und getrocknet (Durchspülung mit trockenem Helium für fünf Stunden bei 90°C). In den konstanten Fluss des Trägergases Helium wird anschließend ein definierter Impuls Analysegas injiziert und die Laufzeit des Impulses von einem Detektor gemessen. Die injizierten Gasmoleküle adsorbieren auf der Oberfläche der Partikel. Hierbei entspricht das Nettoretentionsvolumen dem Volumen, welches benötigt wird, um das Trägergas durch die Säule zu eluieren und ist ein Maß für die Wechselwirkung zwischen dem Trägergas und der Partikelsäule. Werden unterschiedliche Analysesegase verwendet, kann die freie Oberflächenenergie der Partikel berechnet werden. Hierfür kann sowohl die Methode nach DORRIS-GRAY [41] als auch nach SCHULTZ [170] verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Ansatz von Dorris-Gray zur Bestimmung der freien Oberflächenenergie verwendet, da dieser in der Literatur (z. B. [178]) als genauer beschrieben wird.

Die Messung der freien Oberflächenenergie erfolgt bei 30°C und $\ll 1\%$ relativer Luftfeuchte (Taupunkt $< -95^\circ\text{C}$). Als Analyse-gase (Probemoleküle) kommen n-Heptan, n-Oktan, n-Nonan und n-Dekan zur Bestimmung des dispersiven Anteils sowie anschließend Toluol bzw. Ethylacetat für den spezifischen Anteil der freien Oberflächenenergie zum Einsatz. Die Messung der freien Oberflächenenergie erfolgt bei einer Belegung der Partikeloberfläche mit den genannten Probemolekülen in einem Bereich von 0,5 – 15%. Für die Messungen wird der Surface Energy Analyzer (Fa. Surface Measurement Systems, London) [191] verwendet.

5.1.4 Fließeigenschaften mittels Ringscherzelle

Die Fließeigenschaften der verwendeten Partikelkollektive werden mittels der Ringscherzelle RST-XS (Fa. Dr. Dietmar Schulze Schüttgutmesstechnik, Wolfenbüttel) charakterisiert. Hierfür werden die Fließorte der Proben ermittelt, die sich wiederum aus Schubspannungs-Scherweg-Verläufen in Scherversuchen ergeben. Der Fließort wird je Probe aus vier Stützstellen ermittelt. Die Fließfähigkeit ff_c [-] wird über das Verhältnis von Verfestigungsspannung σ_1 [N/mm²] zu Druckfestigkeit σ_c [N/mm²] beschrieben [104, 216]:

$$ff_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (29)$$

Je größer die Festigkeit im Verhältnis zur Verfestigungsspannung ist, umso schlechter fließt ein Schüttgut. Die Fließfähigkeit ist i. d. R. von dem vorherrschenden Spannungsniveau abhängig und sollte daher bestenfalls unter den für den Anwendungsfall relevanten Normalspannungsbereich untersucht werden. Die Normalspannungen, unter denen die Probe gesichert wird, werden mit 1000 Pa, 2000 Pa und 4000 Pa¹⁰ festgelegt.

5.1.5 Topographie und Ermittlung charakteristischer Rauheitskennwerte der Feststoffoberflächen

Die verwendeten Feststoffoberflächen werden mit einem digitalen 3D-Laserscanningmikroskop (LSM) untersucht. Hierbei rastert ein konfokaler Laser in der x-y-Ebene über die Probenoberfläche. Das von der Probenoberfläche reflektierte Laserlicht geht durch einen halbdurchlässigen Spiegel und trifft auf das Lichtaufnahmeelement mit vorgeschalteter Lochblende, wo die Reflexionsintensität und die Höhenposition der Linse abgespeichert werden. Dieser Abtastvorgang wird entlang der z-Achse mehrfach wiederholt. Ist die detektierte Lichtintensität eines Punktes höher als in der vorherigen Messebene, ist dieser schärfer fokussiert und der Wert mit der zugehörigen z-Position der Linse wird überschrieben. Schließlich liegen die maximalen Intensitätswerte eines jeden Punktes mit der zugehörigen Höheninformation vor und die Topographie der Probe kann dargestellt werden [47, 97]. An den ermittelten Topographien der Proben werden Linienrauheiten

¹⁰ In den durchgeführten Reinigungsversuchen treten Normalspannungen von ca. 500 Pa auf. Dieses geringe Spannungsniveau kann jedoch in der Ringscherzelle nicht realisiert werden, sodass mit einer bestmöglichen Annäherung gearbeitet wird.

entlang einer Einzelmessstrecke von $\sim 200 \mu\text{m}$ bestimmt. Flächenrauheiten werden auf einer Fläche von $\sim 200 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ bestimmt.

Außerdem wird die Topographie der Feststoffoberflächen mit dem AFM (Fa. Agilent Technologies 5500 AFM, Santa Clara, USA) aufgenommen. Eine mechanische Spitze am freien Ende eines mikromechanischen Federbalkens (Cantilever) rastert die zu untersuchende Oberfläche mithilfe eines Piezoaktuators systematisch ab [9, 184]. Während sich die Spitze beim Scanprozess über die Oberfläche bewegt, ist ein Laserstrahl auf die Rückseite des Cantilevers gerichtet, dessen Reflexion auf einer Photodiode detektiert wird. Der Verlauf des optischen Signals ermöglicht die Berechnung von Höheninformationen und damit auch die Topographiedarstellung.

5.1.6 Freie Oberflächenenergie der Feststoffoberflächen mittels Kontaktwinkelmethode

Bei der Bestimmung der freien Oberflächenenergie γ_S [mN/m] eines Festkörpers S nach der (Lewis) Säure-Base-Theorie wird zunächst eine Aufspaltung in einen Lifshitz-van-der-Waals-Anteil (γ_S^{LW}) und einen Säure-Base-(acid-base)-Anteil (γ_S^{AB}) angenommen. Letzterer setzt sich wiederum aus einem Lewis-Säure-Base-Elektronenakzeptor- (γ_S^+) und einem Elektronendonatoranteil (γ_S^-) zusammen [199]:

$$\gamma_S = \gamma_S^{LW} + \gamma_S^{AB} = \gamma_S^{LW} + 2(\gamma_S^+ \gamma_S^-) \quad (30)$$

Darüber hinaus gilt nach VAN OSS ET AL. [200]:

$$\gamma_L(1 + \cos\vartheta) = 2\sqrt{\gamma_L^{LW}\gamma_S^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_L^+\gamma_S^-} + 2\sqrt{\gamma_S^+\gamma_L^-} \quad (31)$$

Hierbei ist ϑ [°] der Kontaktwinkel im Dreiphasenpunkt. Ist die Kenntnis der Parameter γ_L^{LW} , γ_L^+ , γ_L^- der Flüssigkeit L bekannt und verwendet man drei verschiedene Flüssigkeiten, so ist die freie Oberflächenenergie γ_S berechenbar.

Tabelle 3: Aus der Literatur [48] entnommene Kennwerte zur Bestimmung der freien Oberflächenenergie aus Kontaktwinkelmessungen

Flüssigkeit	Dosier- rate [$\mu\text{L/s}$]	γ_L [mN/m]	γ_L^{LW} [mN/m]	γ_L^+ [mN/m]	γ_L^- [mN/m]
¹¹					
Wasser	0,06	72,80	21,80	25,50	25,50
Glycerin	0,2	64,00	34,00	3,92	57,40
Methylenio- did	0,06	50,80	50,80	0	0

¹¹ Die Dosierrate wurde an die Viskosität der Flüssigkeit angepasst.

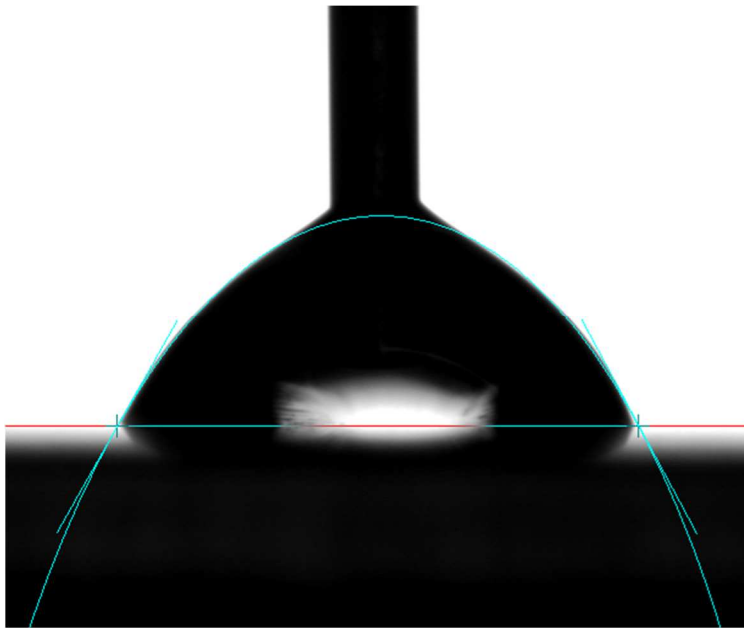


Abbildung 15: *Kontaktwinkelmessung im Dreiphasenpunkt mit angelegten Tangenten*

Vor der Messung werden alle Proben mit destilliertem Wasser und Isopropanol gereinigt. Anschließend werden eventuelle Rückstände mit Druckluft entfernt und die Probe auf dem verfahrbaren Probentisch des Kontaktwinkelmessgeräts *Contact Angle System OCA 20* (Fa. Data Physics, Bad Vibel) positioniert. Bei 20°C wird mit drei Flüssigkeiten (destilliertes Wasser, Methyleniodid und Glycerin) bei konstanter Dosierate der fortschreitende Kontaktwinkel¹² auf den Proben bestimmt. Hierfür wird eine Tangente im Dreiphasenpunkt angelegt (siehe Abbildung 15). Die zur Berechnung der freien Oberflächenenergie verwendeten Kennwerte der Flüssigkeiten sind in Tabelle 3 angegeben.

5.2 Beschreibung der Adhäsionskraftmessung mit einzelnen Partikeln

Die Adhäsionskräfte zwischen einzelnen Partikeln und Festkörperoberflächen werden mit einem AFM (Fa. Agilent Technologies 5500 AFM, Santa Clara, USA) anhand von Kraft-Abstands-Kurven ermittelt (sog. colloidal probe technique).

Zur Messung von Kraft-Abstands-Kurven wird ein Cantilever mit einer Spitze oder einem fixierten Partikel zunächst in Kontakt mit der Probe gebracht. Anschließend wird der Cantilever wieder von der Probe entfernt, wobei der Unterschied zwischen der Krümmung des Cantilevers im Zustand der Annäherung und des Abzugs von der Probenoberfläche bei Kenntnis seiner Federkonstante die vorherrschende Adhäsionskraft zwischen Partikel und Probe berechenbar macht (siehe Abbildung 16). Die Federkonstante wurde mit

¹² Die Hysterese von fortschreitendem und rückschreitendem Kontaktwinkel wird u.a. auf den Einfluss der Topographie zurückgeführt [137]. Da diese separat erfasst wird, wird die Kontaktwinkelhysterese messtechnisch nicht erfasst.

der thermal-noise-Methode nach [83] ermittelt. Bei jeder Probe wurde aus 64 (8x8 Mapping) gemessenen Kraft-Weg-Kurven auf einer $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ großen Fläche die Adhäsionskraft zwischen einem einzelnen Partikel und der Oberfläche ermittelt¹³.

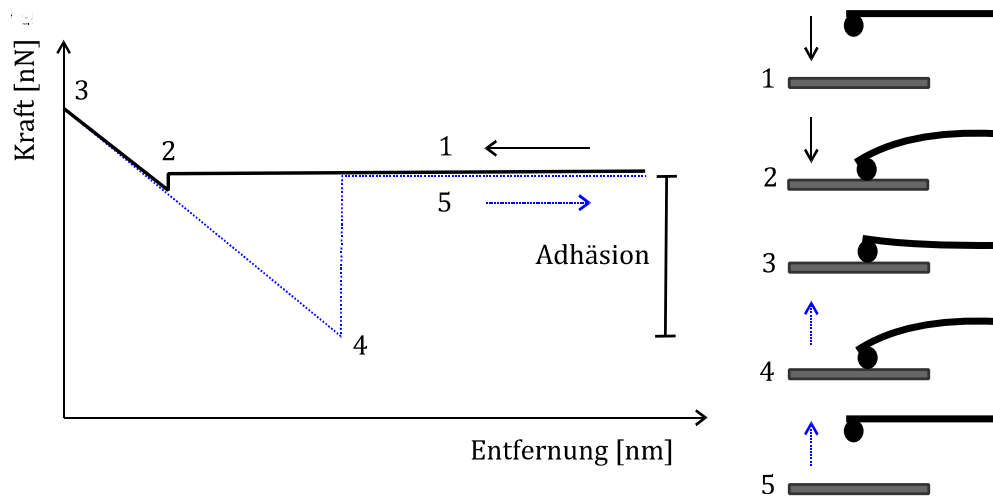


Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Kraft-Abstands-Kurve zur Ermittlung der Adhäsionskraft

Bei den hier durchgeführten Versuchen werden Cantilever mit sphärischen Partikeln aus SiO_2 und Polystyrol (PS) verwendet ($d = 2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$; Fa. sQube, Bickenbach, Deutschland, vgl. Abbildung 17).

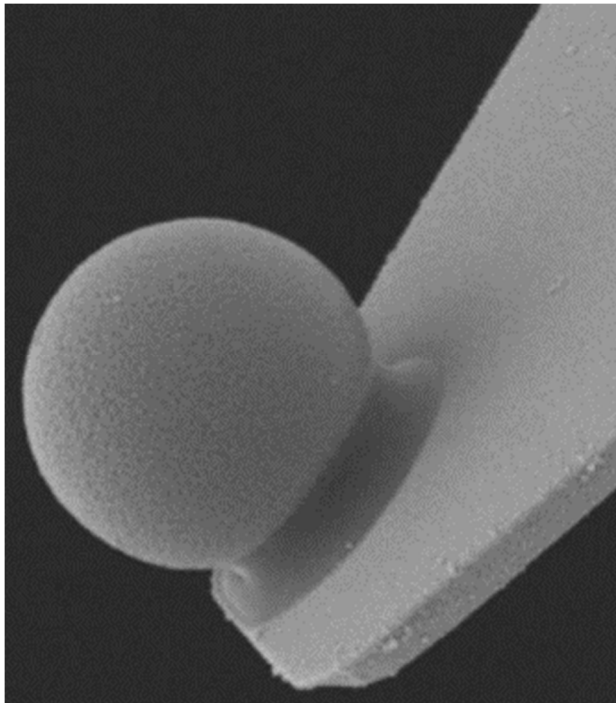


Abbildung 17: Cantilever bestückt mit sphärischem Mikropartikel zur Messung der Wechselwirkungskräfte zwischen Partikel und Feststoffoberfläche [180]

¹³ Auf der Fläche, die zur Ermittlung der Rauheit herangezogen wurde, wurde zudem die Adhäsionskraft bestimmt.

Die Adhäsionskräfte werden bei 23°C ($\pm 1,5$ K) und $\ll 1\%$ relativer Luftfeuchte (r. F., Taupunkt $< -95^\circ\text{C}$) gemessen, um den Einfluss von Kapillarkräften auszuschließen. Um diese definierten Umgebungsbedingungen zu gewährleisten, befinden sich die Probenoberfläche und der Cantilever während der Messung in einer abgedichteten Zelle. Diese wird permanent mit trockenem Stickstoff ausgeblasen. Für die Messungen, die erhöhte Luftfeuchten erfordern, wird mit Wasser angereicherter Stickstoff in die Zelle eingeleitet bis sich die gewünschte Luftfeuchte eingestellt hat. Die Probe wird hierbei nicht bewegt, so dass an exakt dem gleichen Ort die Adhäsionskraft gemessen werden kann und topographiebedingte Streuungen ausgeschlossen werden können.

5.3 Beschreibung der Reinigungsversuche mit Partikelkollektiven

Um die Reinigbarkeit von Substraten zuverlässig beurteilen zu können, sind reproduzierbare und quantifizierbare Versuche notwendig. Die Versuche wurden im Folgenden beschriebenen Versuchsstand durchgeführt.

Zunächst wird der verwendete Probekörper dekontaminiert (Entfettung, Reinigung mit destilliertem Wasser, Entfernung eventueller partikulärer Rückstände mit Druckluft). Anschließend erfolgt eine definierte Kontamination mit jeweils drei Prüfflächen je untersuchter Feststoffoberfläche ($d_{\text{Prüffläche}} = 70$ mm, Belegungsdichte $2,6 \text{ mg/cm}^2$ bzw. $5,2 \text{ mg/cm}^2$). Die verwendeten Kontaminationen sowie die je Prüffläche aufgetragene Menge ist Tabelle 4 zu entnehmen und ist exemplarisch in Abbildung 19 für die Kontamination A1 gezeigt. Das Partikelsystem wird zunächst in Wasser dispergiert, um eine gleichmäßige Verteilung der Partikel auf der Oberfläche zu ermöglichen. Erst nach der vollständigen Verdunstung des Wassers wird die Probe in den Versuchsstand (siehe Abbildung 18) eingebaut. Ein Reinigungsschlitten mit eingespanntem Einmal-Reinigungstuch fährt angetrieben durch eine Lineareinheit mit Schrittmotor mit definierter Geschwindigkeit v [m/s] über die kontaminierten Prüfflächen. Hiermit wird ein reproduzierbarer Wischvorgang gewährleistet.¹⁴ Schließlich wird die auf den Prüfflächen zurückbleibende Restpartikelmenge quantifiziert.

Tabelle 4: *Verwendete partikuläre Kontaminationen für die Versuche sowie die jeweils verwendete Methode zur Bestimmung des Rückstandes (PZ=Partikelzähler mit angeschlossener Oberflächensonde; SL=Streifenlichtmessgerät)*

Bezeichnung	Menge je Prüffläche	Detektionsmethode
A1	0,1 g	PZ
A2	0,1 g	SL
A2_fein	0,1 g	PZ
A3	0,1 g	SL
KSL	0,2 g	SL

¹⁴ Dass eine Übertragbarkeit von im Labor erzielten Reinigungs- und Reinigbarkeitsergebnissen zu denen in Feldstudien generierten Messwerten existiert, konnten METTLER und CARPENTIER [126] zeigen. Daher ist von einem ausreichend praxisrelevanten Versuchsaufbau auszugehen.

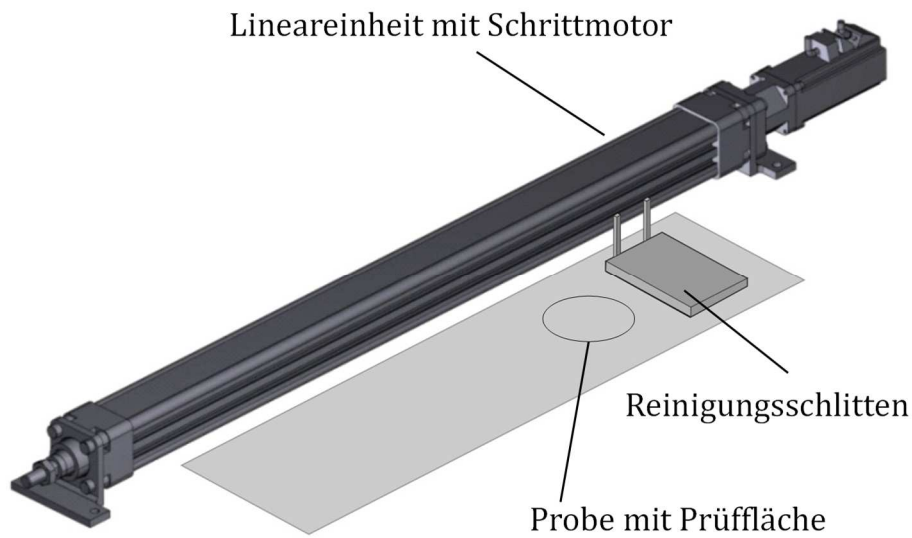


Abbildung 18: *Lineareinheit mit Schrittmotor zur Simulation eines Scheuer-Wisch-Vorganges*

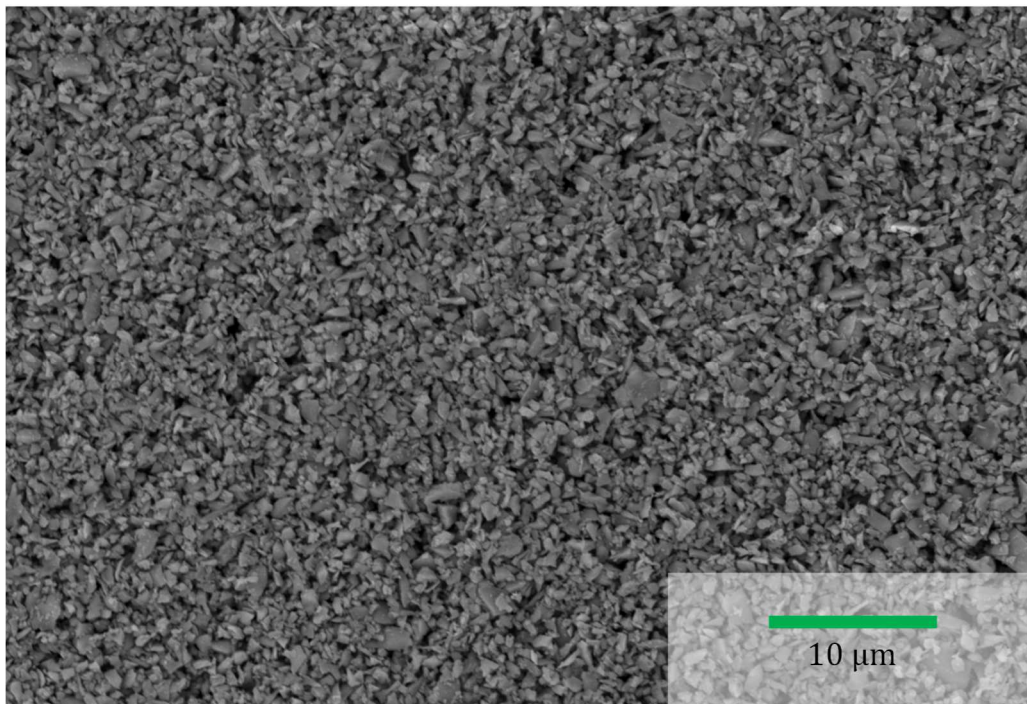


Abbildung 19: *REM-Aufnahme des Partikelkollektivs A1 vor der Reinigung*

Die Restpartikelmenge wird mithilfe des Partikelzählers *Solair 3100 E* (Fa. Lighthouse, Fremont, [112]) mit angeschlossener Sonde für Partikelmessungen auf Oberflächen bestimmt. Die Oberflächensonde wird auf die jeweilige Prüffläche aufgesetzt und ist durch

einen O-Ring ($d=70\text{ mm}$) zur Umgebung abgedichtet. Anschließend werden die Partikel über die Sonde in den Partikelzähler gesaugt, wo anhand von Laserbeugung die Partikelgröße und -anzahl bestimmt werden und eine Klassierung in einen Partikelgrößenkanal (PGK, $d>0,3\text{ }\mu\text{m}$, $d>0,5\text{ }\mu\text{m}$, $d>1,0\text{ }\mu\text{m}$, $d>3,0\text{ }\mu\text{m}$, $d>5,0\text{ }\mu\text{m}$, $d>10,0\text{ }\mu\text{m}$) erfolgt. Dieses indirekte Messverfahren wird für die feinen Kontaminationen A1 und A2_{fein} verwendet, da mindestens 95% der Partikel im Bereich $d<10\text{ }\mu\text{m}$ liegen und somit der Messbereich durch den Partikelzähler sehr gut abgedeckt wird. Je Probe werden neun Wiederholungsmessungen durchgeführt.

Für gröbere Kontaminationen (A2, A3, KSL) wird das direkt auf der Oberfläche arbeitende Streiflichtmessgerät PartSens (Fa. PMT Partikelmessstechnik GmbH, Heimheim, Deutschland [142]) verwendet. Auf einer aktiven Messfläche von $5 \times 7\text{ mm}^2$ wird die Restpartikelanzahl auf sechs Stellen der Feststoffoberfläche bestimmt. Hierfür werden die mit dem Gerät aufgenommenen Graubilder in Binärbilder umgewandelt und anhand dieser die Größe der partikulären Kontamination bestimmt (vgl. Abbildung 20). Es erfolgt eine Klassierung der Kontamination in einen Partikelgrößenkanal ($5\text{ }\mu\text{m}<d\leq 15\text{ }\mu\text{m}$, $15\text{ }\mu\text{m}<d\leq 25\text{ }\mu\text{m}$, $25\text{ }\mu\text{m}<d\leq 50\text{ }\mu\text{m}$, $50\text{ }\mu\text{m}<d\leq 100\text{ }\mu\text{m}$, $100\text{ }\mu\text{m}<d\leq 150\text{ }\mu\text{m}$, $150\text{ }\mu\text{m}<d\leq 200\text{ }\mu\text{m}$, $200\text{ }\mu\text{m}<d\leq 400\text{ }\mu\text{m}$, $400\text{ }\mu\text{m}<d\leq 600\text{ }\mu\text{m}$, $600\text{ }\mu\text{m}<d\leq 1000\text{ }\mu\text{m}$, $d>1000\text{ }\mu\text{m}$). Eine oberflächenspezifische Beleuchtungsintensität sowie ein Schwellwert zur Kontaminationsidentifikation sind erforderlich, um den Einfluss der optischen Eigenschaften der Probe auszuschließen. Diese Kalibrierung erfolgt für jede Probe mittels eines herstellerseitigen Algorithmus.

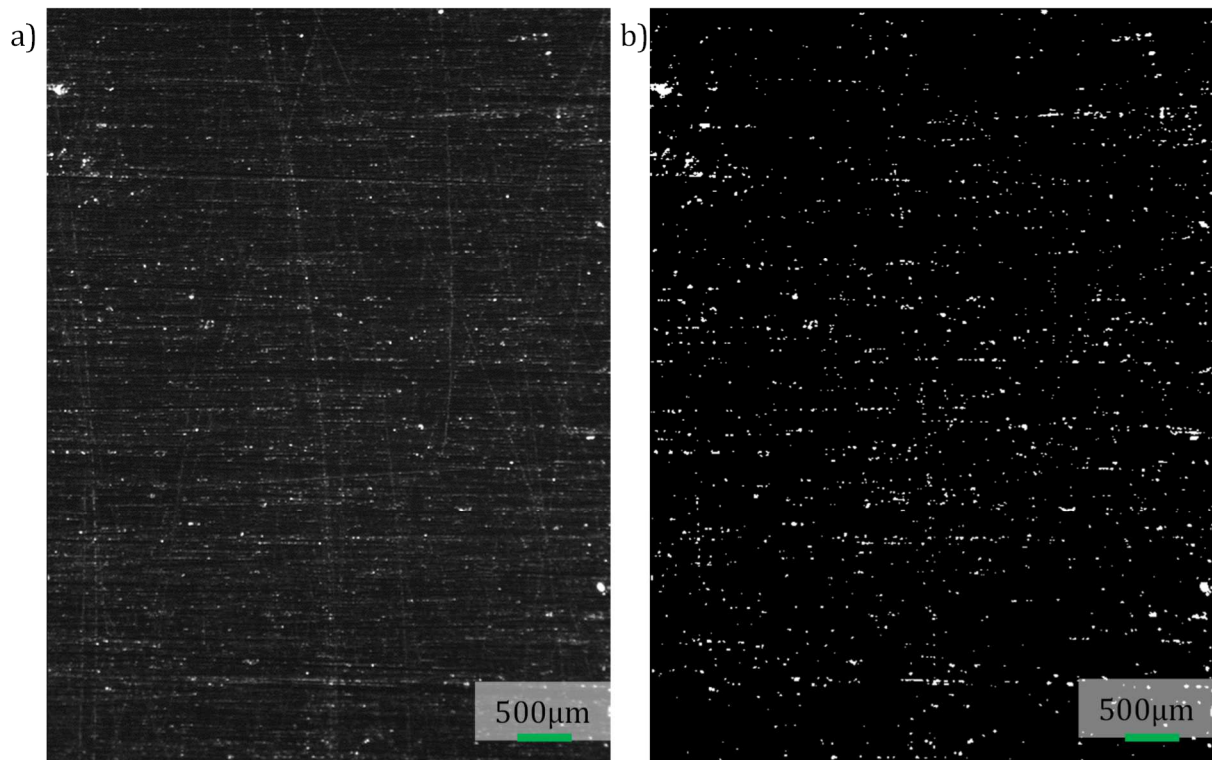


Abbildung 20: Graustufen- (a) und Binärbild (b) einer mittels Streiflicht untersuchten Feststoffoberfläche (Probe E1, Kontamination A2)

5.4 Beschreibung der Besiedlungsversuche

Um die Persistenz von Mikroorganismen auf krankenhausblichen Oberflächen bewerten zu können, wird ein standardisierter Versuchsaufbau¹⁵ verwendet. Das im Folgenden beschriebene Prozedere wird für alle Proben angewandt.

Zur Vorbereitung der Probekörper werden die Edelstahlproben vor der Kontamination mit 96% Ethanol und Polymerprobekörper mit destilliertem Wasser gereinigt¹⁶. Ober- und Unterseite der Probekörper werden im Anschluss für je 1 h unter der Sicherheitswerkbank in offenen Petrischalen UV-sterilisiert.

Für die Herstellung der Keimsuspension werden zunächst je 10 mL Casein-Sojapepton-Boullion (TSB)¹⁷ mit der gewünschten Teststammkultur (*S. aureus*, *Ps. aeruginosa*, *C. albicans* oder *A. baumannii*) beimpft und bei 150 UpM im Inkubationsschüttler bebrütet (24 ± 4 h, 37°C). 0,15 mL der Übernachtskultur werden in 1,5 mL Reaktionsgefäßen zentrifugiert (15 000 g, 5 min, 15°C). Der Überstand wird verworfen und das Pellet in 0,15 mL 0,9%iger NaCl-Lösung suspendiert. Die Suspension wird erneut zentrifugiert und der Überstand abermals verworfen. Das Pellet wird in eine 50 mL Probenröhre überführt und in 15 mL 0,3%iger Boviner Serumalbumin-Lösung (BSA) suspendiert.

Zur Kontamination wurde die vorbereitete Keimsuspension auf die Oberseite der Probekörper (1,5 x 1,5 cm²) aufgebracht: Als Stempel dienen sterile Schwammtücher (Naturfaser Schwammtücher, Fa. Kalle, Wiesbaden) von 1,5 x 1,5 cm² Größe, die in einer Petrischale mit 15 mL Keimsuspension getränkt und mit einer sterilen Pinzette gewendet werden. Die Probekörper werden anschließend mit der Pinzette auf den Stempel gelegt. Vor jedem weiteren Probekörper werden die Schwammtücher erneut in der Keimsuspension gewendet. Die beimpften Proben werden mit der beimpften Seite nach oben in offenen Petrischalen bei 22°C lichtgeschützt inkubiert. Zudem wird die Luftfeuchtigkeit erfasst (Temperatur-Feuchtelogger LOG 32 TH, Dostmann electronic GmbH, Wertheim).

Die Probennahmezeitpunkte sind so gewählt, dass sie die Ausgangszellzahl (0 h nach der Kontamination), die Zellzahl nach dem Trocknen (3 h) und typische Reinigungsintervalle (24, 48 und 72 h) widerspiegeln. Zu diesen Zeitpunkten werden jeweils drei Probekörper je Probe mit einer sterilen Pinzette in eine 50 mL Probenröhre mit 10 mL physiologischer Kochsalz-Lösung und 5 g sterilen Glasperlen (3 mm Durchmesser, Soda-Kalkglas, Dragon-Werk Georg Wild, Bayreuth) gegeben und ausgeschüttelt (10 min, 400 UpM, 15°C). Die Zellzahlbestimmung in der Extraktionsflüssigkeit erfolgt mittels Oberflächenverfahren auf Casein-Sojapepton-Agar (CSA) nach Erstellen einer dezimalen Verdünnungsreihe.

¹⁵ Der Versuchsaufbau ist auch in DREßLER ET AL. [42] beschrieben.

¹⁶ Die bedingte chemische Beständigkeit von einigen Polymerproben (z. B. aus Polyvinylchlorid) gegenüber Ethanol könnte zu einer Veränderung der Oberflächeneigenschaften führen, sodass eine Reinigung mit destilliertem Wasser bevorzugt wird.

¹⁷ TSB ist ein flüssiges Universal-Anreicherungsmedium, das in der klinischen Mikrobiologie zur Suspension, Anreicherung und Kultivierung von nicht übermäßig beanspruchten Mikroorganismen verwendet wird.

Nach der Inkubation (24 ± 4 h, 37°C) werden für die Auswertung Platten mit 1 – 300 Kolonien herangezogen. Sind zu einem Zeitpunkt auf einer Oberfläche keine Keime mehr nachweisbar, werden – unter der Annahme, dass die Zellzahl nicht wieder ansteigt – keine weiteren Bestimmungen durchgeführt. Der schematische Ablauf dieses Versuchs ist in Abbildung 21 dargestellt.

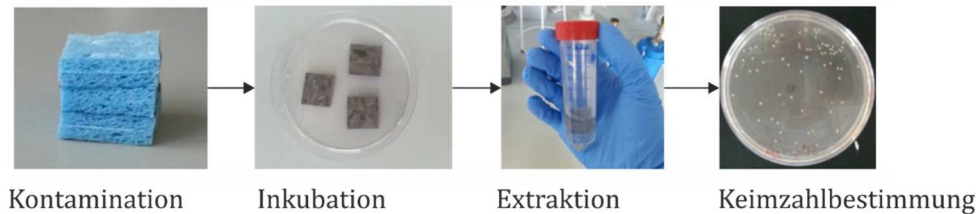


Abbildung 21: *Ablauf der Besiedlungsversuche*

5.5 Verwendete Materialien

5.5.1 Feststoffoberflächen

Für die eigenen Versuche werden verschiedene Materialien, welche typischerweise in Krankenhäusern zum Einsatz kommen, verwendet. Die Methoden, die zur Charakterisierung der Feststoffoberflächen verwendet werden, sind in Kapitel 5.1 beschrieben. In den folgenden Tabellen (Tabelle 5 bis Tabelle 11) sind die wesentlichen Oberflächeneigenschaften zusammengefasst: Die Mittenrauheit R_a [μm] als Flächenkennwert ermittelt mit dem LSM bzw. AFM ($R_{a, \text{Fläche, LSM}}$ [μm] und $R_{a, \text{AFM}}$ [μm]) sowie entlang einer Einzelmessstrecke ($R_{a, \text{LSM}}$ [μm]), der Benetzungswinkel mit destilliertem Wasser ϑ [$^\circ$] sowie die freie Oberflächenenergie γ_s [mN/m]. Sind keine Anisotropien der Oberfläche zu erwarten, wird keine Flächenrauheit ermittelt. Mikroskopieaufnahmen aller untersuchten Feststoffoberflächen sind dem Anhang zu entnehmen.

Es werden sechs Edelstahlproben mit der Werkstoffnummer 1.4301 untersucht. Diese sind mit unterschiedlicher Körnung (120-400) orientiert geschliffen (E1, E3-6) und elektropoliert (E2). Wird die Prüfrichtung unterschieden, werden die Proben durch die zusätzliche Bezeichnung a) orthogonal und b) in Schleifrichtung gekennzeichnet. Edelstahl findet in Form von Armaturen bis hin zum Operationssaalinventar Anwendung in Krankenhäusern. Der häufige direkte Kontakt zu Patienten und Personal macht dieses Material zum wesentlichen Untersuchungsgegenstand.

Tabelle 5: *Bezeichnung und wesentliche Oberflächeneigenschaften der untersuchten Edelmetalle (1)*

Proben- bezeichnung	$R_{a,LSM}$ [μm]	$R_{a,Fläche,LSM}$ [μm]	ϑ [°]	$\vartheta_{Fläche}$ [°]	γ_S [mN/m]	$\gamma_{S,Fläche}$ [mN/m]
E1a	1,03	0,91	106,9	94,3	24,62	27,56
E1b	0,20	0,91	81,7	94,3	30,50	27,56
E2	0,34	0,16	61,7	61,7	37,86	37,86
E3a	0,93	0,55	109,4	97,1	23,34	26,77
E3b	0,51	0,55	84,7	97,1	30,20	26,77
E4a	0,86	0,64	110,2	99,8	23,20	31,05
E4b	0,42	0,64	89,4	99,8	38,89	31,05
E5a	0,21	0,41	99,5	97,0	33,45	32,99
E5b	0,07	0,41	94,4	97,0	32,52	32,99
E6a	0,47	0,36	95,6	90,5	19,94	28,57
E6b	0,27	0,36	85,3	90,5	37,20	28,57

Tabelle 6: *Bezeichnung und wesentliche Oberflächeneigenschaften der untersuchten Edelmetalle (2)*

Proben-be- zeichnung*	$R_{a,AFM}$ [μm]	F_{adh} [nN]	$\sigma(F_{adh})$ [nN]	$R_{a,AFM,PS}$ [μm]	$F_{adh,PS}$ [nN]	$\sigma(F_{adh,PS})$ [nN]
E1	0,21	161,2	54,1	0,09	113,6	96,8
E2	0,01	194,3	6,4	0,02	44,2	41,8
E3	0,32	147,5	41,4	0,22	100,4	103,6
E4	0,18	182,5	23,6	0,22	31,7	32,9

* nicht näher spezifizierte Kennwerte wurden mit einer SiO₂-Spitze ($d=2\text{ μm}$) ermittelt

15 Polymerproben (P1-P15, PVC) werden im Rahmen der Versuche verwendet, wobei aufgrund der Topographie (starke Makrostrukturierung) die Proben P14 und P15 nicht für die Reinigungsversuche geeignet sind. Es wird vermutet, dass sich die Zusammensetzung der Proben unterscheidet, da diese in ihrer Haptik und Optik voneinander abweichen. Die untersuchten Proben werden in Krankenhäusern in Form von elastischen Boden- und Wandbelägen verwendet und stellen flächenmäßig das am meisten vertretene Material dar.

Tabelle 7: *Bezeichnung und wesentliche Oberflächeneigenschaften der untersuchten Polymerproben*

Probenbezeichnung	$R_{a,LSM}$ [μm]	ϑ [$^\circ$]	γ_s [mN/m]
P1	1,84	69,9	26,77
P2	1,39	78,1	23,28
P3	2,59	78,0	30,06
P4	2,70	78,1	26,74
P5	3,15	77,0	31,08
P6	1,42	87,4	24,36
P7	4,42	70,5	32,00
P8	1,71	74,0	25,79
P9	1,76	69,9	24,29
P10	3,43	85,1	29,60
P11	1,60	76,7	34,23
P12	1,29	79,1	33,70
P13	1,39	80,1	32,04
P14	0,79	93,9	19,61
P15	0,95	83,4	19,59

Zwei emaillierte Stahlproben (S1-S2) mit unterschiedlicher Zusammensetzung werden untersucht. Stahlemaille wird insbesondere in Nasszellen verwendet.

Tabelle 8: *Bezeichnung und wesentliche Oberflächeneigenschaften der untersuchten Stahlemailleproben*

Probenbezeichnung	$R_{a,LSM}$ [μm]	ϑ [$^\circ$]	γ_s [mN/m]
S1	0,06	104,2	24,53
S2	1,29	68,4	40,08

Fünf Beschichtungen auf der Basis von Polyurethane (B1-B5) werden im Weiteren untersucht. Diese dienen der Versiegelung von Oberflächen und werden u. a. in Laboren, Küchen und Therapieräumen angewendet.

Tabelle 9: *Bezeichnung und wesentliche Oberflächeneigenschaften der untersuchten Betonbeschichtungen*

Probenbezeichnung	$R_{a,LSM}$ [μm]	ϑ [$^\circ$]	γ_s [mN/m]
B1	0,23	57,1	37,80
B2	0,61	52,1	33,74
B3	1,70	69,4	30,63
B4	3,89	68,7	34,09
B5	3,16	85,3	34,73

Zwei Kupferlegierungen jeweils orientiert geschliffen (K1, K3) und glasperlengestrahlt (K2, K4) werden untersucht. Die Kupferlegierungen werden in eine Materialgruppe eingeordnet, da davon auszugehen ist, dass sich oberflächlich eine Kupferoxidschicht ausbildet und sich somit das Materialverhalten trotz verschiedener Legierungselemente stark ähnelt. Kupferlegierungen werden in Gesundheitseinrichtungen beispielsweise als Armaturen eingesetzt.

Tabelle 10: *Bezeichnung und wesentliche Oberflächeneigenschaften der untersuchten Kupferlegierungen*

Proben- bezeich- nung	$R_{a,LSM}$ [μm]	$R_{a,Fläche,LSM}$ [μm]	ϑ [°]	$\vartheta_{Fläche}$ [°]	γ_S [mN/m]	$\gamma_{S,Fläche}$ [mN/m]
K1a	0,64	0,50	108,2	101,5	17,16	24,63
K1b	0,36	0,50	94,7	101,5	32,10	24,63
K2	0,77	0,50	94,3	94,3	32,22	32,22
K3a	0,63	0,42	113,6	105,4	15,59	24,25
K3b	0,20	0,42	97,1	105,4	32,90	24,25
K4	0,82	0,56	84,8	84,8	29,14	29,14

Bei den Siliziumproben handelt es sich um eine Siliziumprobe mit eingetätzter Linienstruktur (Si1), einen glatten kristallinen Wafer (Si2) und schwarzes Silizium mit homogener nadelförmiger Oberfläche (Si3). Silizium bietet die Möglichkeit die Oberflächenstruktur über das Chemical-dry-etching-Verfahren [147] definiert einzustellen und ist chemisch homogen. Daher wird es als Referenzmaterial für die Adhäsionskraftmessungen mit dem AFM verwendet.

Tabelle 11: *Bezeichnung und wesentliche Oberflächeneigenschaften der untersuchten Siliziumproben (1)*

Proben- bezeich- nung	$R_{a,LSM}$ [μm]	$R_{a,Fläche,LSM}$ [μm]	ϑ [°]	$\vartheta_{Fläche}$ [°]	γ_S [mN/m]	$\gamma_{S,Fläche}$ [mN/m]
Si1a	0,88	0,45	123,6	105,3	1,48	18,98
Si1b	0,01	0,45	86,9	105,3	36,48	18,98
Si2	0,01	0,01	58,6	58,6	28,00	28,00
Si3	0,27	0,27	129,6	129,6	7,84	7,84

Tabelle 12: *Bezeichnung und wesentliche Oberflächeneigenschaften der untersuchten Siliziumproben (2)*

Proben-be- zeichnung*	$R_{a,AFM}$ [μm]	F_{adh} [nN]	$\sigma(F_{adh})$ [nN]	$R_{a,AFM,PS}$ [μm]	$F_{adh,PS}$ [nN]	$\sigma(F_{adh,PS})$ [nN]
Si1	0,31	100,5	63,4	0,19	134,7	78,7
Si2	0,00	198,3	7,8	0,01	242,2	21,9
Si3	0,04	16,3	14,2	0,04	1723,5	1249,7

* nicht näher spezifizierte Kennwerte wurden mit einer SiO₂-Spitze ($d=2\text{ μm}$) ermittelt

5.5.2 Partikuläre Ausgangskontamination

Für die Reinigungsversuche kommen partikuläre Systeme als Kontaminationen zum Einsatz, die sich hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung und Fließfunktion unterscheiden. Es kommen mehrere Partikelsysteme zum Einsatz, da die in der Praxis vorkommenden partikulären Kontaminationen (z. B. Viren, Bakterien, Staub) ebenso verschiedene Größenspektren abdecken (vgl. Kap. 4.2).

Die Partikelgrößenverteilung wurde mit dem Prinzip der Laserbeugung in einer dreifach Bestimmung an einer hoch verdünnten wässrigen Suspension ermittelt (Helos, Fa. Sympatec, Clausthal-Zellerfeld, Deutschland [193]). Die Nassbestimmung ist gegenüber der Trockenbestimmung zu bevorzugen, da der Einsatz von Ultraschall möglich ist. Somit erfolgt eine verbesserte Dispergierung der Partikel und die Agglomeration der Primärpartikel wird stark reduziert. Wesentliche Charakteristika der verwendeten Partikelsysteme sind in der Tabelle 13 dargestellt. Die Partikelgrößenverteilung sowie Mikroskopieaufnahmen der Kontaminationen sind dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 13: *Charakteristika der verwendeten Partikelsysteme*

Bezeichnung	Material	d_{50} [μm]	γ_s [m]/ m^2]	Partikelgrößenverteilung
A1	SiO ₂	3,43	69,41	Anhang
A2_fein	SiO ₂	3,67	69,41	
A2	SiO ₂	3,70	69,41	
A3	SiO ₂	10,29	69,41	
KSL	Mineralische Fasern	49,19	48,83	

Die Fließfunktionen der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten partikulären Kontaminationen sind in der Abbildung 22 dargestellt. Die Fließfähigkeit ff_c nimmt – mit Ausnahme von A2_grob – mit steigender Verfestigungsspannung bei den untersuchten Partikelsystemen zu. Die grobe Kontamination KSL weist gegenüber den anderen Partikelsystemen eine deutliche höhere Fließfähigkeit im leicht bis frei fließenden Bereich auf. Die feineren Kontaminationen (A1, A2, A2_fein, A3) sind überwiegend kohäsiv.¹⁸

¹⁸ Die Einteilung der Fließfähigkeit erfolgt nach TOMAS [197] und JENIKE [85].

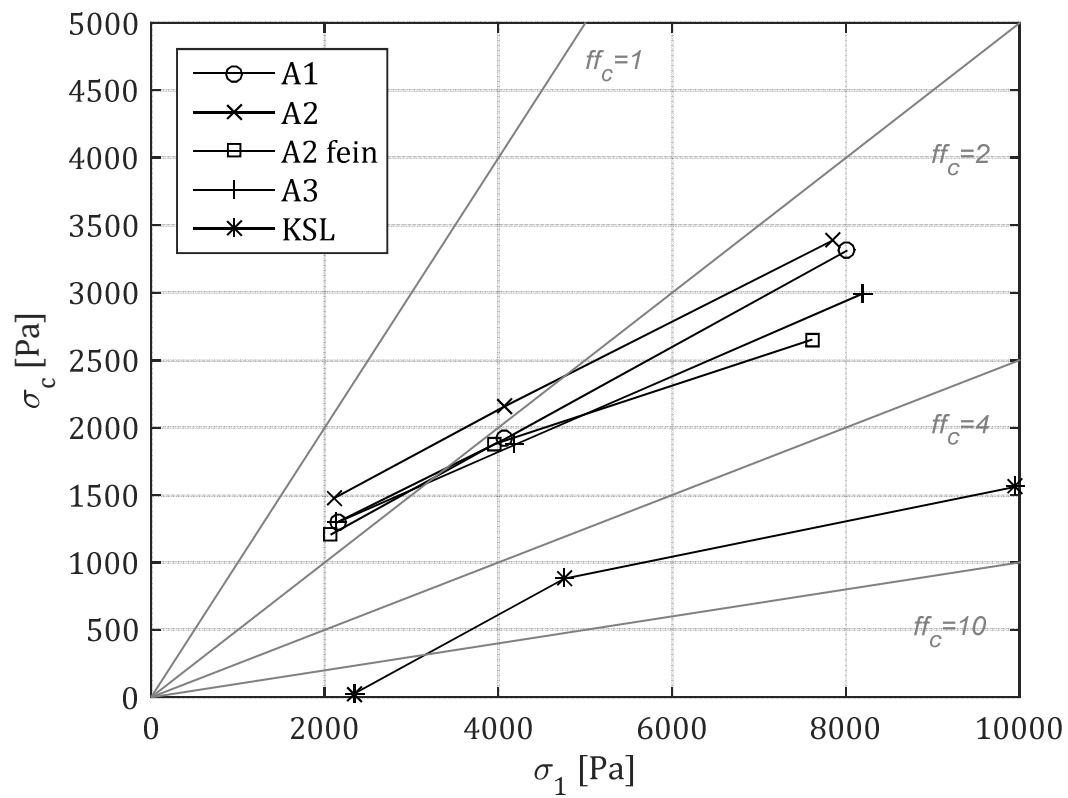


Abbildung 22: Aus Fließorten ermittelte Fließfunktionen der partikulären Kontaminationen A1, A2_{fein}, A2, A3 und KSL

5.6 Versuchsprogramm

Tabelle 14: Überblick über die untersuchten Parameter und verwendeten Detektionsmethoden

Art der Untersuchung	Untersuchter Parameter	Feststoffoberfläche	Partikelsystem/Erreger	Detektionsmethode	Wiederholungen je Probe	Kapitel
Adhäsion (Einzelpartikel)	Topographie Adhäsionsmapping Partikel	E1-E4, Si1-Si3	SiO ₂ $d = 2 \mu\text{m}$, SiO ₂ $d = 6,62 \mu\text{m}$, PS $d = 2 \mu\text{m}$	AFM	64	6.1, 6.2
	Tenside/Reinigung	Si2	SiO ₂ $d = 2 \mu\text{m}$	AFM	64	6.3
	Feuchte (0, 25, 50% r. F)	E1-E4, Si1-Si3	SiO ₂ $d = 2 \mu\text{m}$	AFM	64	6.4
Reinigung (Partikelkollektiv)	Oberflächeneigenschaften, Kontamination	E1a-E6b, P1-P13, K1a-K4b	A2, A3, KSL	SL	6	7.2.1, 7.2.2
	Oberflächeneigenschaften	E1a-E6b, P1-P13, S1-S2, B1-B5, K1a-K4b	A1	PZ	9	7.2.1
	Konzentration	P4, P7, P9	A1	PZ	9	7.2.2
	Geschwindigkeit	E1a-E6b	A1	PZ	9	7.2.3
	Feuchte	E1-E6 jew. b	A1	PZ	9	7.2.3
	Wischhübe	P9	A1	PZ	9	7.2.3
	Lappenwechsel	E1a-E6b	A1	PZ	9	7.2.3
	Kontamination	E1a-E6b	A1, A2_fein	PZ	9	7.2.2
Persistenz	Oberflächeneigenschaften	E1-E6, P1, P4, P5, P7, P10-P15	<i>S. aureus</i>	Oberflächenverfahren auf CSA	3	8.2
	Erreger	E1-E6	<i>Ps. aeruginosa</i> , <i>C. albicans</i> , <i>A. baumannii</i>	Oberflächenverfahren auf CSA	3	8.3
	Oligodynamik	K1-K4	<i>S. aureus</i>	Oberflächenverfahren auf CSA	3	8.4

AFM=atomic force microscope, SL=Streiflichtmessverfahren; PZ=Partikelzähler mit angeschlossener Oberflächensonde

6 Experimentelle Ergebnisse und Auswertung der Adhäsionskraftmessung

Für die Experimente mit Einzelpartikeln wird die Adhäsionskraft zwischen einem Partikel und der Feststoffoberfläche mithilfe eines AFMs bestimmt. Um eine Reproduzierbarkeit der Messung zu ermöglichen, werden hierfür sphärische SiO₂-Partikel verwendet. Diese besitzen zum einen eine geringe Nanorauheit und kommen somit der idealen Kugel - von der bei der Adhäsionstheorie ausgegangen wird - nahe; zum anderen werden in den Experimenten mit Partikelkollektiven SiO₂-Systeme untersucht. In einzelnen Messreihen kommen PS-Partikel zur Anwendung. Wesentliche Einflussparameter auf das Messergebnis werden aus der Theorie der Adhäsionskräfte hergeleitet und im Experiment überprüft. Ziel ist es, die Übertragbarkeit der Erkenntnisse von den nahezu idealen Bedingungen im Einzelpartikelversuch auf die technische Ebene des Reinigungsversuchs mit einem Partikelkollektiv, der mindestens die Überwindung der Adhäsion fordert, zu examinieren.

6.1 Einfluss der Oberflächeneigenschaften

Zunächst soll überprüft werden, ob die Theorie der Adhäsionskräfte mit den durchgeführten Adhäsionskraftmessungen übereinstimmt.¹⁹

Die mit dem AFM gemessenen Adhäsionskräfte eines sphärischen SiO₂-Partikels ($d=2\text{ }\mu\text{m}$) korrelieren mit der freien Oberflächenenergie von Edelstahl- und Silizium-Proben (vgl. Abbildung 23). Die Messdaten zeigen, dass die gemessenen Adhäsionskräfte jedoch deutlich unter den nach dem DMT-Modell (vgl. Gl. (24)) kalkulierten Werten liegen. Es wird vermutet, dass die Messergebnisse wesentlich durch die Rauheit der Probe, welche im DMT-Modell keine Berücksichtigung findet, beeinflusst werden und die Adhäsionskräfte aufgrund des erhöhten Kontaktabstandes deutlich reduzieren. Außerdem verläuft die Regression an die Messdaten nicht durch den Koordinatenursprung, was vermuten lässt, dass die freie Oberflächenenergie als alleinige erklärende Variable für die gemessene Adhäsionskraft nicht ausreicht.

¹⁹ Die Ergebnisse des Kap. 6.1 sind in ähnlicher Form in DREßLER ET. AL [43] beschrieben.

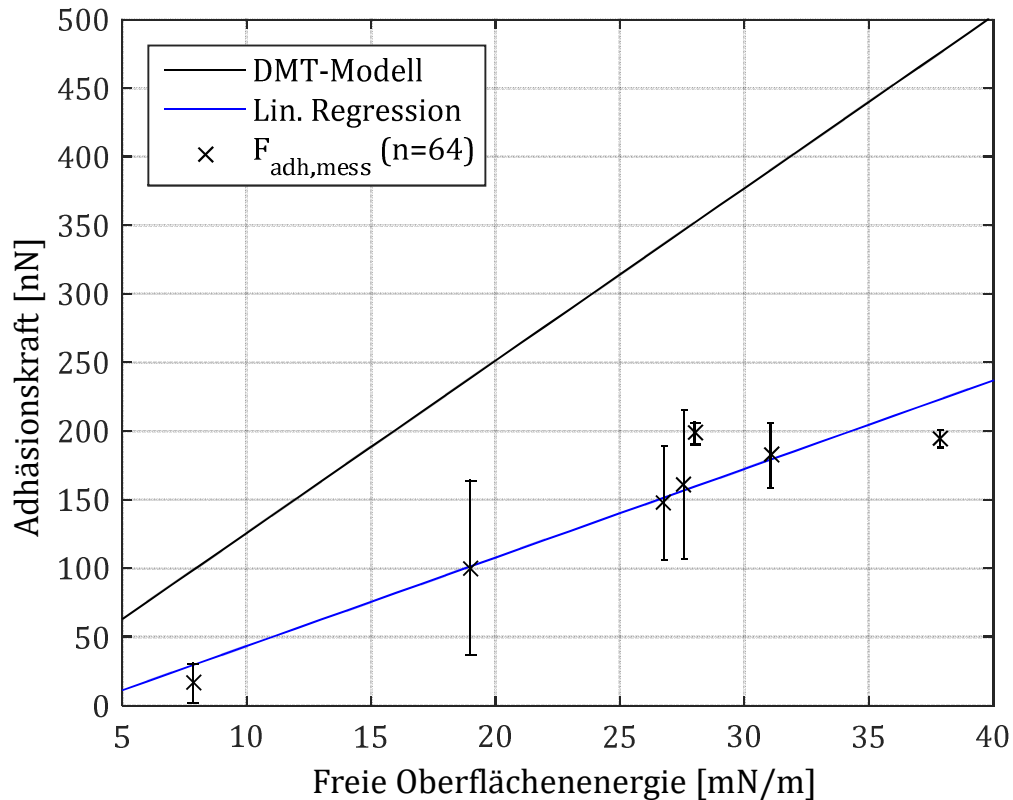


Abbildung 23: Lineare Regression der mit dem AFM an Edelstahl (E1-E4) und Silizium (Si1-Si3) gemessenen Adhäsionskraft eines sphärischen $2\text{ }\mu\text{m}$ - SiO_2 -Partikels (Stichprobenumfang je Probe $n=64$; Bestimmtheitsmaß der Mittelwerte an die Regression $R^2=0,90$) im Vergleich zu der rechnerischen Adhäsionskraft nach dem DMT-Modell

Rabinovichs Theorie (Gl. (19)) zeigt, dass sich die adhäsiven Kräfte zwischen Partikeln und rauen Oberflächen gegenüber glatten Kontaktpartnern verringern, da ein größerer wirksamer Abstand zwischen den Kontaktpartnern vorliegt. Diese Tendenz kann an den untersuchten Proben bestätigt werden (Abbildung 24) mit steigender Flächenrauheit (gemessen mit dem AFM) reduziert sich die Adhäsionskraft zwischen Partikel und Oberfläche.

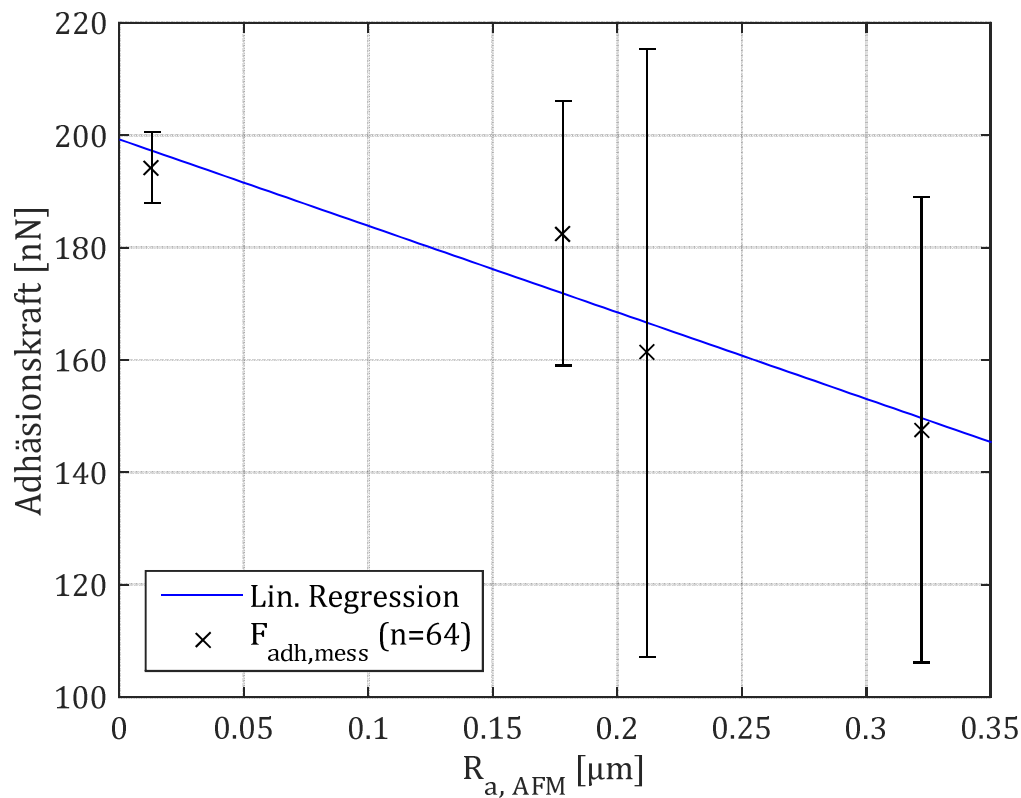


Abbildung 24: Regression der mit dem AFM an Edelstahlproben (E1-E4) gemessenen Adhäsionskraft in Abhängigkeit von der Flächenrauheit (Flächenrauheit gemessen mit dem AFM; Stichprobenumfang je Probe $n=64$; Bestimmtheitsmaß der Mittelwerte an die Regression $R^2=0,88$)

Wird die an Edelstahl- und Siliziumproben sowohl mit dem AFM als auch mit dem LSM gemessene Rauheitskenngröße R_a betrachtet, so zeigt sich kein Zusammenhang der beiden Parameter (vgl. Abbildung 25). Folglich ist aufgrund der Korrelation zwischen Adhäsionskraft und der mit dem AFM ermittelten Flächenrauheit kein Zusammenhang zwischen der Adhäsionskraft und der mit dem LSM gemessenen Rauheit gegeben. Dies ist vermutlich auf die unterschiedlichen Messbereiche vom LSM und dem AFM zurück zu führen: Die Adhäsionskräfte werden in dem Bereich bestimmt, in dem auch die (lokale) Rauheit mit dem AFM ermittelt wird. Das LSM hingegen ermittelt die Flächenrauheit an den Proben über einen deutlich größeren Messbereich und inkludiert auch größere Gestaltabweichungen. Dieser Sachverhalt wird schematisch in Abbildung 26 dargestellt.

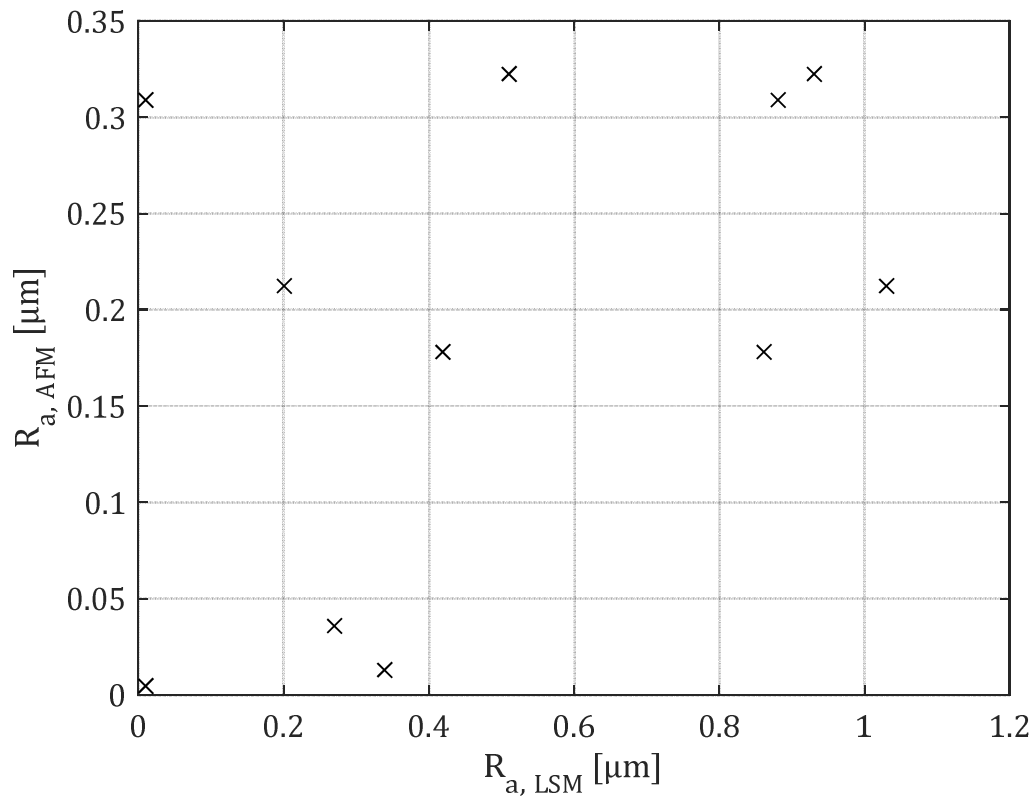


Abbildung 25: Rauheitsparameter R_a an Edelstahl- und Siliziumproben (E1-E4, Si1-Si3) gemessen mit dem LSM und dem AFM ($R^2=0,19$)

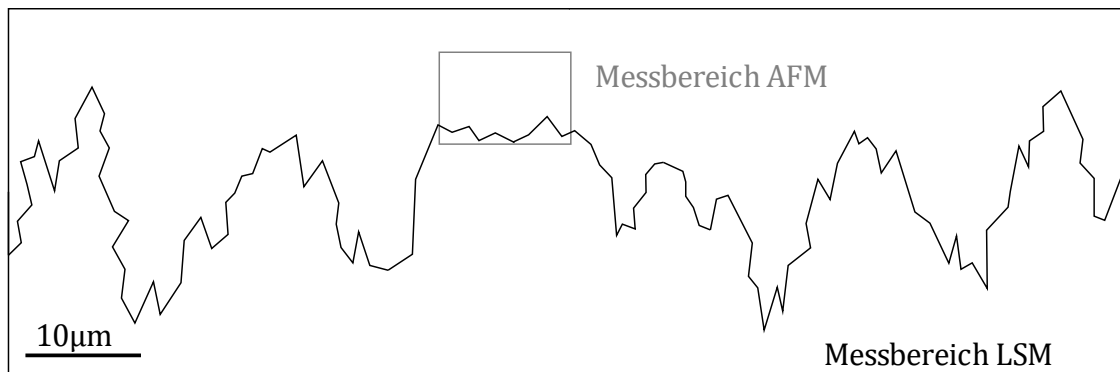


Abbildung 26: Einfluss des Messbereichs auf den ermittelten Rauheitskennwert (schematische Darstellung)

Unabhängig vom Probenmaterial zeigt sich, dass die Adhäsionskraftverteilung durch die Topographie beeinflusst wird. In Abbildung 27 ist dieser Sachverhalt verdeutlicht: Oberflächen mit sehr geringer Rauheit und homogener Topographie weisen gegenüber Oberflächen mit größerer Rauheit und heterogener Struktur deutlich geringere Streuungen der Adhäsionskräfte auf. Die sehr homogene Topographie ermöglicht immer ähnliche Kontaktgeometrien zwischen Partikel und Oberfläche und resultiert in quantitativ vergleichbaren Adhäsionskräften. Stark strukturierte Oberflächen, wie der geschliffene Edelstahl oder eine definiert geätzte Linienstruktur bei Silizium, führen bei jedem Kontakt

zwischen Partikel und Oberfläche zu anderen Kontaktgeometrien. Stark streuende Adhäsionskräfte, die mit einer breiten Adhäsionskraftverteilung und großen Streuungen einhergehen, sind die Folge. Vergleichbare Erkenntnisse sind in [64, 86, 208] beschrieben.

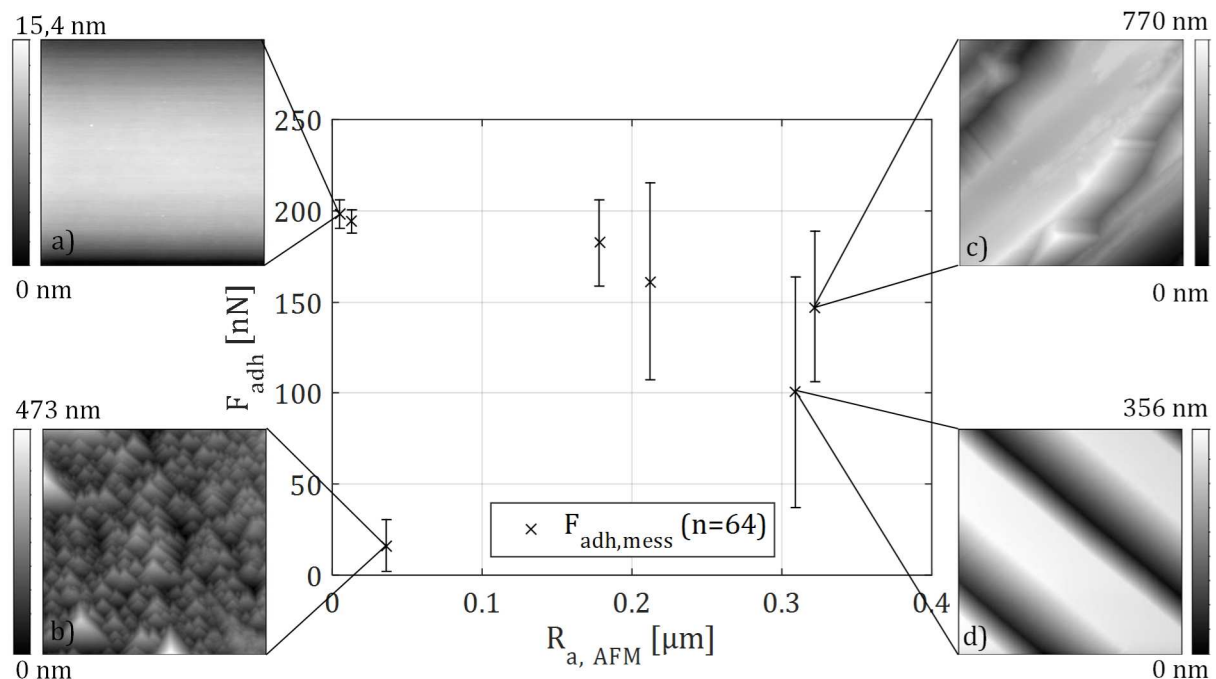


Abbildung 27: Streuungen der Haftkräfte in Abhängigkeit der Rauheit und der Topographie von Silizium (a, b, d) und Edelstahl (c) auf einer Fläche von $10 \times 10 \mu m^2$

6.2 Einfluss des Einzelpartikels

Partikelmaterial

Der Einfluss des Einzelpartikels auf die Adhäsionskraft soll untersucht werden. Hierfür werden Adhäsionskraftmessungen auf Edelstahl- (E1-E4) und Siliziumproben (Si1-Si3) von einem kugeligen PS-Partikel mit denen eines SiO_2 -Partikels gleicher Größe ($d=2 \mu m$) verglichen.

Gemäß der Theorie der Adhäsionskräfte (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2) bestehen die wesentlichen Unterschiede der beiden untersuchten Partikel in ungleichen Hamakerkonstanten (vgl. Tabelle 1) und verschiedenen E-Moduln²⁰. Aufgrund der unterschiedlichen Materialkennwerte ist eine Korrelation zwischen den Adhäsionskräften, die mit dem SiO_2 -Partikel und denen, die mit dem PS-Partikel und den Feststoffoberflächen ermittelt werden, zu erwarten. In Abbildung 28 sind die mit den beiden Partikeln ermittelten Messwerte aufgetragen. Ein eindeutiger Zusammenhang der gemessenen Adhäsionskräfte ist jedoch nicht festzustellen.

²⁰ $E_{SiO_2}=8800 \text{ N/mm}^2$; $E_{PS}=2200\text{-}3500 \text{ N/mm}^2$

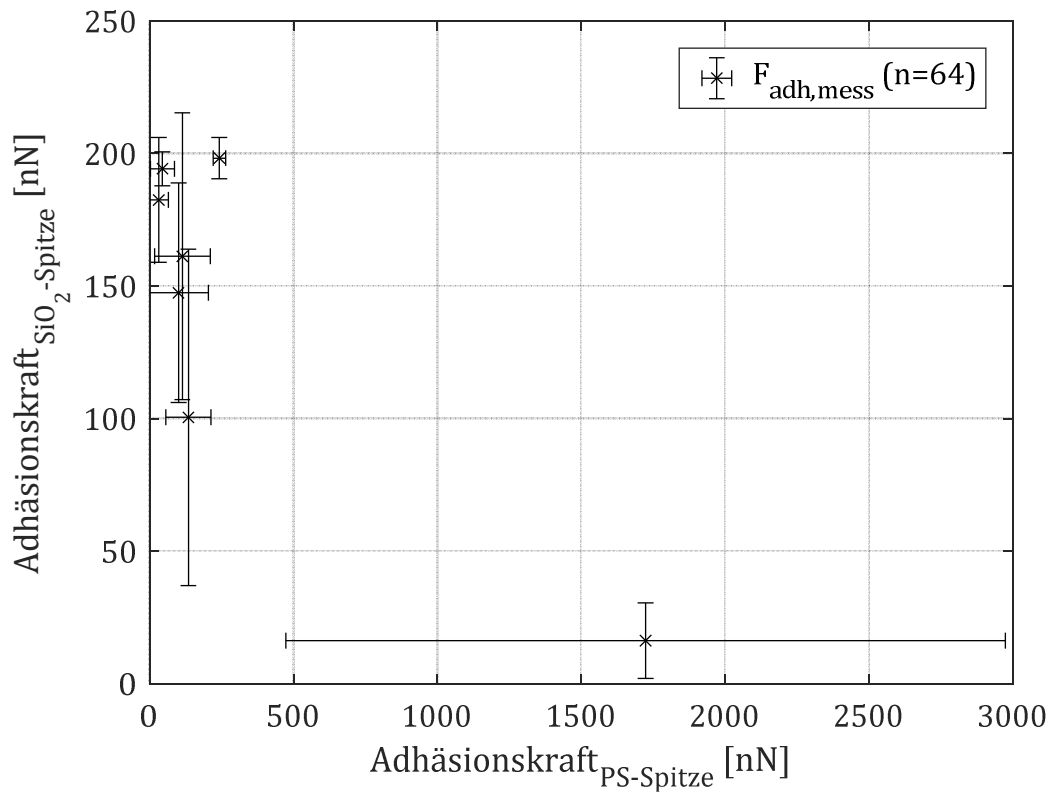


Abbildung 28: Gemessene Adhäsionskräfte zwischen einem sphärischen SiO₂- bzw. einem Polystyrol-Partikel und den Feststoffoberflächen (Edelstahl (E1-E4) und Silizium (Si1-Si3), $d_{\text{Partikel}}=2\text{ }\mu\text{m}$, Stichprobenumfang je Probe $n=64$)

Dies könnte darauf zurück zu führen sein, dass die Adhäsionskräfte aufgrund des Cantileverwechsels nicht exakt an der gleichen Stelle auf den Feststoffoberflächen bestimmt werden konnten. Dies zeigt sich an den jeweils ermittelten Rauheitskennwerten, die mit dem AFM auf der Fläche ($10\times 10\text{ }\mu\text{m}^2$) bestimmt wurden, welche auch für die Adhäsionskraftuntersuchung genutzt wurde: an den Edelstahloberflächen sind lediglich schwache Zusammenhänge zwischen den mit unterschiedlichen AFM-Spitzen ermittelten Rauheiten an der gleichen Probe feststellbar ($R^2=0,6$), wohingegen bei den Siliziumproben eine sehr starke Korrelation der Rauheitskenngrößen ($R^2=0,97$) gegeben ist (vgl. Tabelle 5 und Tabelle 11). Dies ist auf die chemische Homogenität und die definierte Einstellung der Topographie der Siliziumproben zurückzuführen, welche exemplarisch für die Probe Si1 in Abbildung 29 b) gezeigt wird. Die Siliziumproben ermöglichen unabhängig vom Untersuchungsort wiederholbare Kontaktgeometrien zwischen Partikel und Feststoffoberfläche. Dies ist bei den Edelstählen nicht gegeben, wie exemplarisch an den mit den unterschiedlichen AFM-Spitzen untersuchten Topographien der Probe E2 gezeigt werden kann (vgl. Abbildung 31 a) und b)).

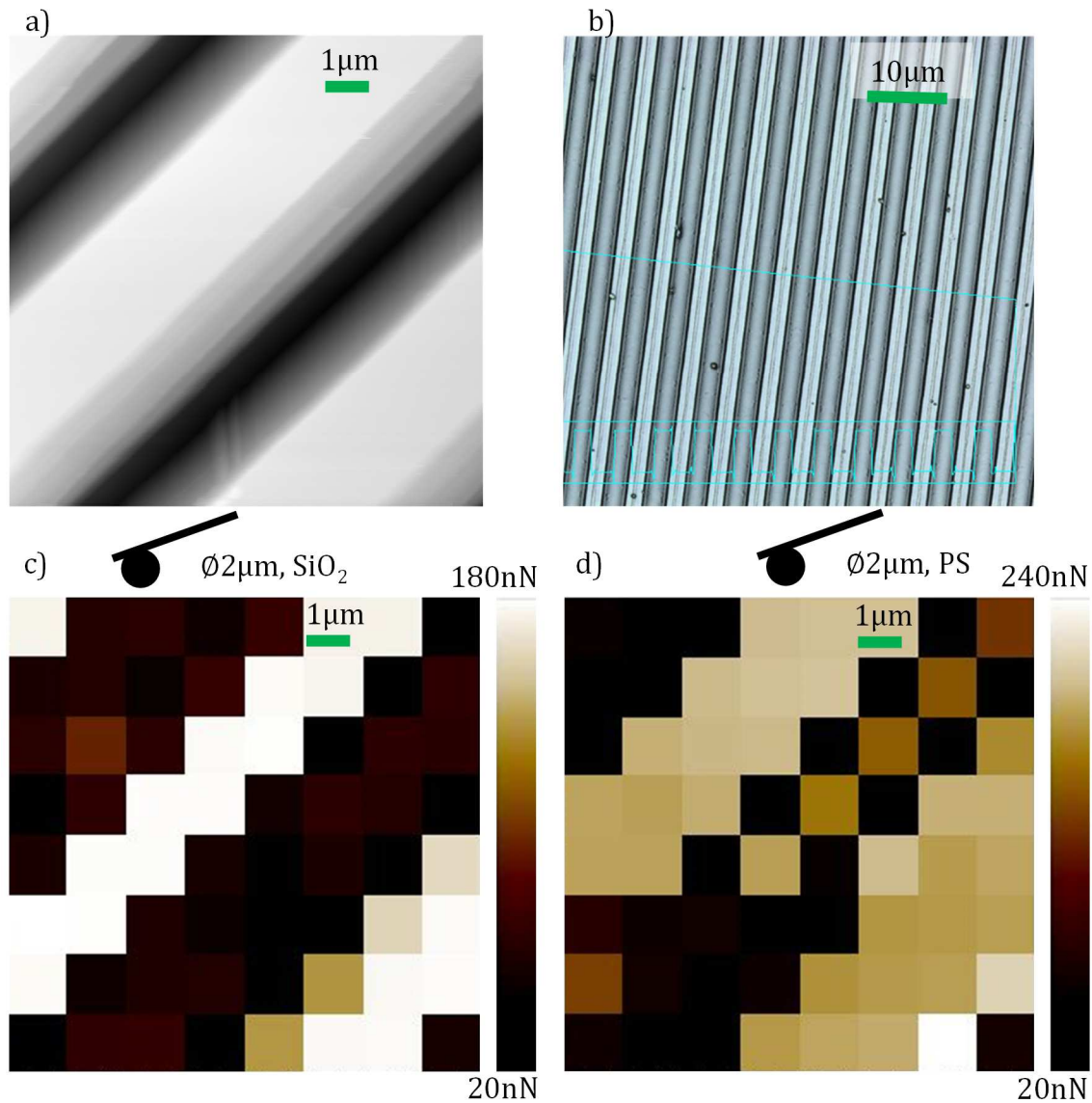


Abbildung 29: Topographie der Feststoffoberfläche Si1 ermittelt mit dem AFM (a) und dem Laserscanning-Mikroskop (b) sowie das auf der gezeigten Topographie durchgeführte Adhäsionsmapping mit der SiO₂-Spitze (c) und der Polystyrol-Spitze (d)

An Siliziumproben zeigen sich unabhängig von dem Partikel qualitativ die gleichen Adhäsionskraftverteilungen auf den untersuchten Flächen. Dies wird exemplarisch an dem Adhäsionsmapping der untersuchten Fläche der Probe Si1 mit der eingetätzten Linienstruktur in Abbildung 29 c) und d) gezeigt. Das steifere SiO₂-Partikel weist entlang der Linienstruktur entweder Bereiche mit sehr hohen oder sehr niedrigen Adhäsionskräften auf. Vermutlich gibt es ausschließlich den Kontaktfall Kugel-Platte (Partikel ist auf oder in der Struktur) sowie Kugel-Kugel (Partikel ist im Randbereich der Struktur, vgl. Abbildung 30 a) und b)). Das weichere PS-Partikel hingegen weist im Adhäsionsmapping weniger deutliche Unterschiede auf. Dies könnte durch eine elastische Deformation der Partikel verursacht werden, welche zu einer größeren Kontaktfläche führt und somit die Kontaktfälle der Partikel verändert und weniger sensitiv auf die Topographieänderung reagiert (vgl. Abbildung 30 c) und d)).

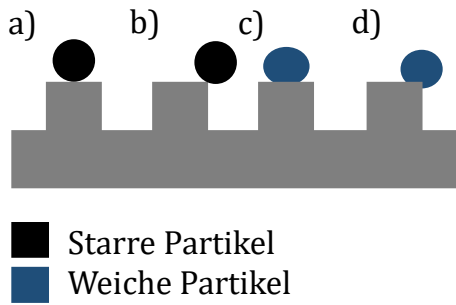


Abbildung 30: Mögliche Kontaktgeometrien zwischen starren bzw. weichen Partikeln und einer definiert strukturierten Oberfläche (schematisch): Kugel-Platte (a), Kugel-Kugel (b) sowie Kontaktfälle mit deformierten Partikeln (c und d)

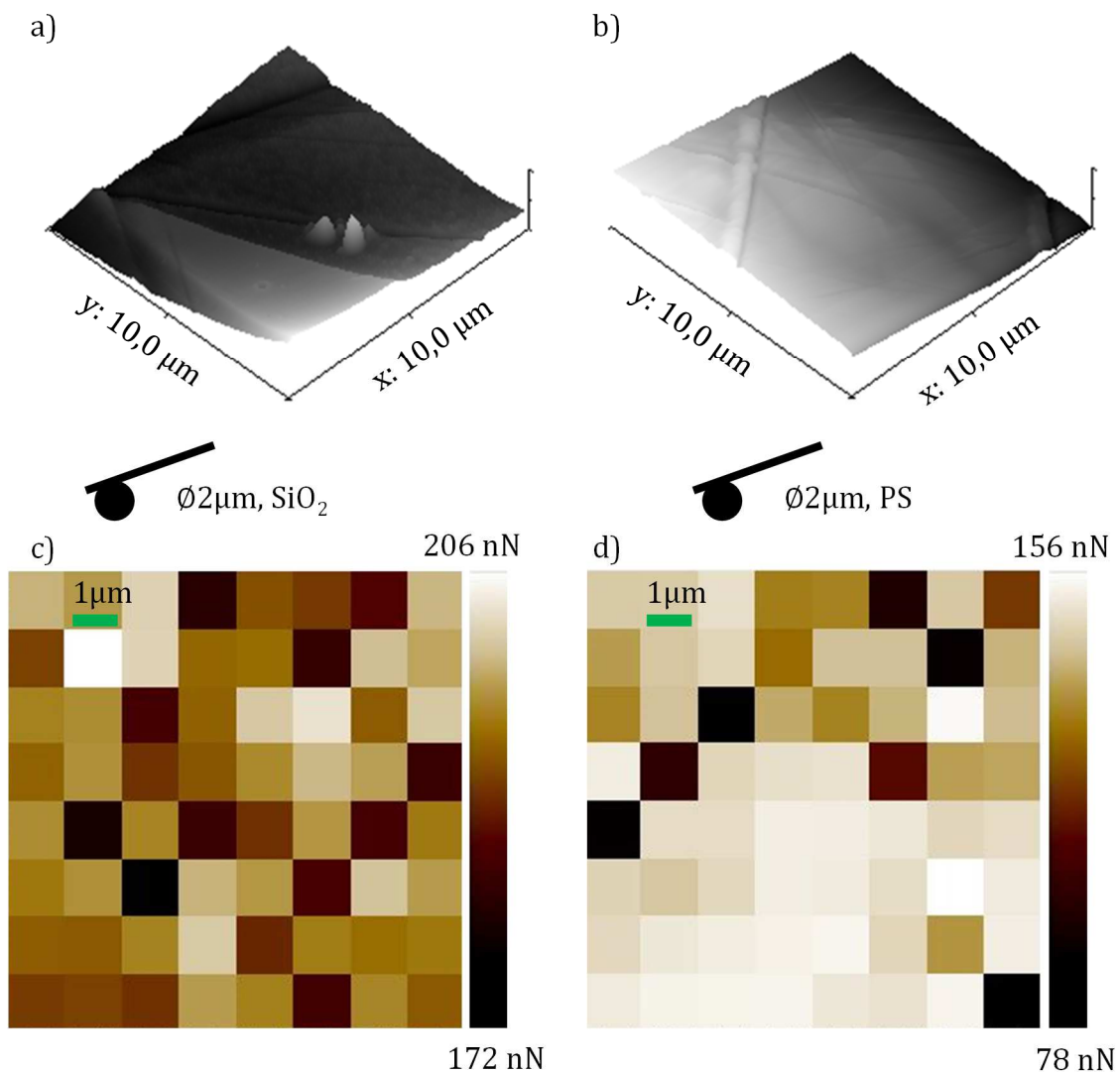


Abbildung 31: Topographie der Feststoffoberfläche E2 ermittelt mit dem AFM (a,b) sowie das auf den gezeigten Topographien durchgeführte Adhäsionsmapping mit der SiO_2 -Spitze (c) und der Polystyrol-Spitze (d)

Der qualitative Vergleich des Adhäsionsmappings an Edelstahlproben mit unterschiedlichen Partikeln ist aufgrund unterschiedlicher Topographien wenig zielführend (Abbildung 31). Dies bestätigt, dass die mit dem AFM-ermittelte Rauheit ein sehr lokaler Kennwert ist, die die Adhäsionskraft lokal beeinflusst, aber nur bedingt Aussagen über eine ganze Probe zulässt.

Partikelgröße

Wird die Adhäsionskraft zwischen einem SiO_2 -Partikel mit $d=6,62\text{ }\mu\text{m}$ und den Feststoffoberflächen bestimmt, so sind gegenüber dem $d=2\text{ }\mu\text{m}$ Partikel deutlich größere Messwerte zu erwarten. Diese Erwartung kann bestätigt werden (Messergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen). Es sei darauf hingewiesen, dass die Zunahme der mittleren Adhäsionskraft überproportional mit größer werdendem Partikeldurchmesser ansteigt. Darüber hinaus ist festzustellen, dass die bei kleineren Partikeln festgestellte Korrelation zwischen freier Oberflächenenergie und gemessener Adhäsionskraft nicht gegeben ist ($R^2 < 0,3$, hier nicht dargestellt). Die Tendenz, dass durch die Rauheit einer Feststoffoberfläche auch die Adhäsionskraft reduziert wird, kann tendenziell festgestellt werden, ein eindeutiger Zusammenhang ist jedoch auch hier nicht gegeben ($R^2 = 0,52$).

Die nähere Betrachtung der Kraft-Weg-Kurven ermöglicht einen Erklärungsansatz für das abweichende Verhalten: für kleine Partikel werden ideale Kraft-Weg-Kurven gemessen. Das Partikel kommt relativ schnell mit der Feststoffoberfläche in Kontakt (jump-to-contact) und beim Ablösevorgang (snap-off) springt der Cantilever unmittelbar in seine Ausgangsposition zurück (vgl. Abbildung 32 links). Das SiO_2 -Partikel mit $d=6,62\text{ }\mu\text{m}$ weist eine nicht ideale Kraft-Weg-Kurve auf (vgl. Abbildung 32 rechts). Ein nicht-lineares Verhalten kann beobachtet werden. Eine stark ausgeprägte Hysterese könnte darauf hinweisen, dass das Partikel sich nicht unmittelbar an einem geometrischen Ort von der Feststoffoberfläche löst, sondern ein sukzessives Ablösen an mehreren Stellen erfolgt, das zudem durch weitreichende Wechselwirkungen begünstigt wird. Eine eindeutige Aussage über den Ort des Ablösens kann somit nicht getroffen werden.

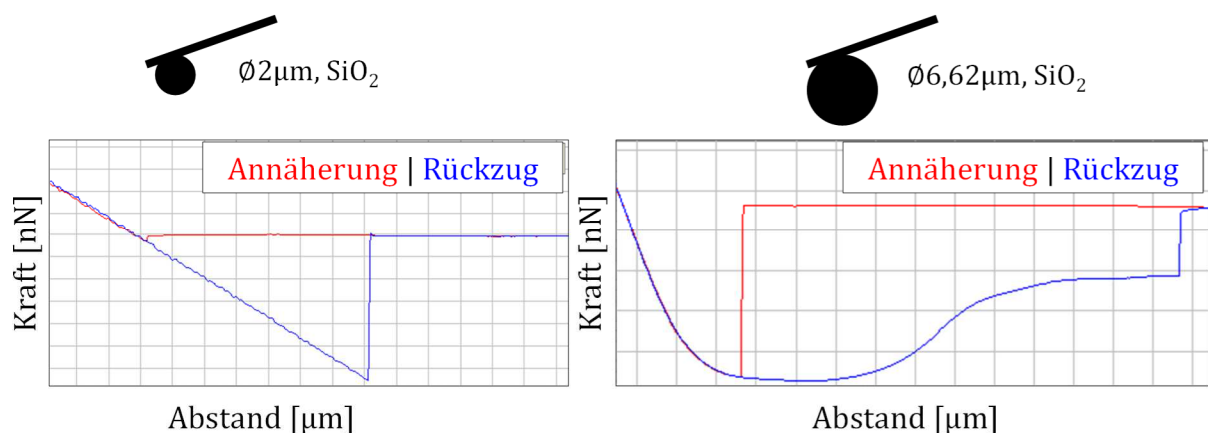


Abbildung 32: Gemessene Kraft-Abstands-Kurve für ein SiO_2 -Partikel mit $d=2\text{ }\mu\text{m}$ (links) und $d=6,62\text{ }\mu\text{m}$ (rechts) auf einer Edelstahlprobe

6.3 Einfluss der Reinigung

Der Einfluss von Reinigungsmittel auf die Adhäsionskräfte zwischen Partikel und Oberfläche soll untersucht werden. Die Messungen werden exemplarisch an einer glatten Siliziumprobe durchgeführt, da auf dieser geringe topographiebedingte Streuungen auftreten. Wird die Probe unmittelbar vor der Messung mit einem mit anionischen Tensiden vorimprägnierten Tuch – welches auch für die Reinigungsversuche verwendet wird – gereinigt, so sind stark erhöhte Adhäsionskräfte sowie starke Streuungen gegenüber der mit Isopropanol gereinigten Probe festzustellen (vgl. Abbildung 33).

Tenside setzen die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit herab bzw. besitzen eine geringe Oberflächenspannung, sodass bei deren Einsatz geringere adhäsive Kräfte zu erwarten sind. Im vorliegenden Fall liegt die Vermutung nahe, dass die tensidbedingte Reduktion der Adhäsionskräfte mit den aus dem Tensidfilm²¹ resultierenden Kapillarkräften überlagert werden und somit insgesamt höhere Kräfte resultieren oder die Tensidmoleküle, die nicht mehr in Lösung vorliegen, zu einer Zunahme der attraktiven Kräfte führen. Es ist wahrscheinlich, dass das Partikel, mit dem die Adhäsionskräfte ermittelt werden, im Messverlauf zunehmend Tensidmoleküle an seiner Oberfläche adsorbiert bis eine maximale Schichtdicke erreicht ist. So bauen sich die zusätzlich wirkenden Kräfte im Messverlauf auf und resultieren in einer größeren Streuung der Messergebnisse. Diese Annahme wird durch die Betrachtung der Adhäsionskraft in Abhängigkeit von der Versuchsreihenfolge bestätigt (vgl. Abbildung 34): bei der mit Tensiden benetzten Probe kommt es zunächst zu einem Anstieg der gemessenen Adhäsionskraft und anschließend zu einem Ausgleichszustand, wohingegen die ausschließlich mit Isopropanol gereinigte Probe ein unverändertes Adhäsionskraftniveau aufweist. Eine Veränderung der wirksamen freien Oberflächenenergie der Feststoffoberflächen nach dem ersten Reinigungsvorgang durch adsorbierte Tensidmoleküle ist wahrscheinlich. Für Reinigungsversuche bedeutet dies, dass bei mehreren Wischhuben eine veränderte Grenzfläche zur Feststoffoberfläche vorliegt.

²¹ Die hier verwendeten Tenside (i. W. Alkylbenzolsulfonate) sind weniger flüchtig (höhere Verdunstungszahl) als das leicht flüchtige Isopropanol.

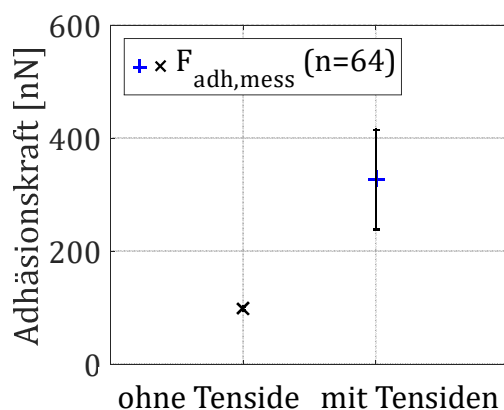


Abbildung 33: Adhäsionskraft zwischen einem sphärischen SiO_2 -Partikel ($d=2\text{ }\mu\text{m}$) und einer ohne und mit Tensiden gereinigten Siliziumoberfläche

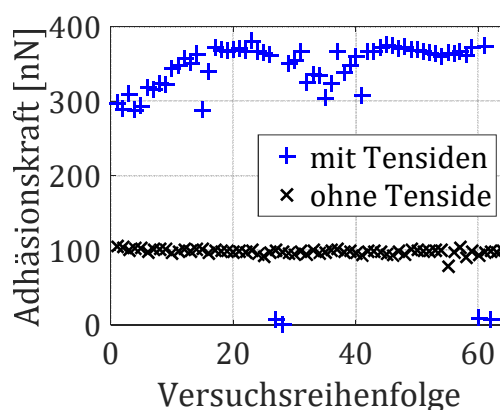


Abbildung 34: Adhäsionskraftentwicklung in Abhängigkeit von der Versuchsreihenfolge auf Siliziumoberflächen mit und ohne Tenside ($n=64$)

6.4 Einfluss der relativen Luftfeuchte

Der Einfluss der Luftfeuchte auf die gemessenen Adhäsionskräfte wird bei 0%²², 25% und 50% r. F. mit einem SiO_2 -Partikel ($d=2\text{ }\mu\text{m}$) geprüft. Eine Zunahme der Adhäsionskräfte wäre gemäß der Theorie der Adhäsionskräfte zu erwarten, da sich mit zunehmender relativer Luftfeuchte größere Kapillarbrücken ausbilden.

Die an den Proben gemessenen Adhäsionskräfte werden über die freie Oberflächenenergie dargestellt und es wird für jeden Luftfeuchtezustand eine lineare Regression an den Mittelwerten der Messdaten durchgeführt (vgl. Abbildung 35). Die Adhäsionskraft folgt mit steigender Luftfeuchte keinem eindeutigen Trend. Im Bereich niedriger Oberflächenenergien (bis ca. 25 mN/m) ist neben der Zunahme der Luftfeuchte auch ein Anstieg der gemessenen Adhäsionskraft festzustellen. Bei höheren Oberflächenenergien kehrt sich dieser Trend um, wobei hohe Luftfeuchten in einer reduzierten Adhäsionskraft gegenüber der trockenen Umgebung resultieren. Sowohl die Adhäsionskraftzunahme als auch -abnahme mit steigender Luftfeuchte wurden bereits auf einzelnen Oberflächen beobachtet. PÖHLMANN ET. AL [144] stellten auf unbehandelten und thermisch oxidierten 6H-SiC-Einkristalloberflächen ($R_a < 0,5\text{ nm}$) eine Reduktion der gemessenen Adhäsionskraft bei zunehmender Luftfeuchte fest. JONES ET. AL [89] konnten auf Silizium- und Glasoberflächen einen Anstieg der gemessenen Adhäsionskraft mit der relativen Luftfeuchte im Bereich von 0 bis 50% r. F. konstatieren.

Ein thermodynamisch stabiler Zustand wird mit dem System minimaler freier Oberflächenenergie erreicht. Unterschiedliche freie Oberflächenenergien resultieren folglich in unterschiedlichem Benetzungsverhalten, welches insbesondere die Ausbildung der Kapillarbrücken an der Kontaktstelle von Partikel und Feststoffoberfläche beeinflusst. Hierbei könnten zwei gegenläufige Effekte auf die Adhäsionskraft wirken:

²² Mit 0% r. F. ist eine Feuchte von $<0,0001\%$ r. F. (Taupunkt $<-95^\circ\text{C}$) gemeint. Hierbei handelt es sich um eine gerundete, vereinfachende Angabe.

Bei höherer Luftfeuchte werden die Kapillarbrücken größer, höhere Kapillarkräfte zwischen Partikel und Oberfläche resultieren. Dieser Effekt dominiert bei niederenergetischen Oberflächen und wirkt sich lediglich marginal auf den Kontaktabstand zwischen Partikel und Feststoffoberfläche aus. Bei zunehmender Luftfeuchte nimmt jedoch auch die adsorbierte Wasserschicht auf den Oberflächen zu. Dies führt zu einem größeren wirksamen Kontaktabstand, der wiederum den van-der-Waals- sowie den elektrostatischen Kraftanteil an der Adhäsion stark reduziert. Dieser Effekt überwiegt bei höherenergetischen Oberflächen, sodass die Kapillarkraftausbildung als Funktion von den Oberflächeneigenschaften des jeweiligen Substrats zu betrachten ist. Eine schematische Darstellung dieser Zustände ist in Abbildung 35 gegeben.

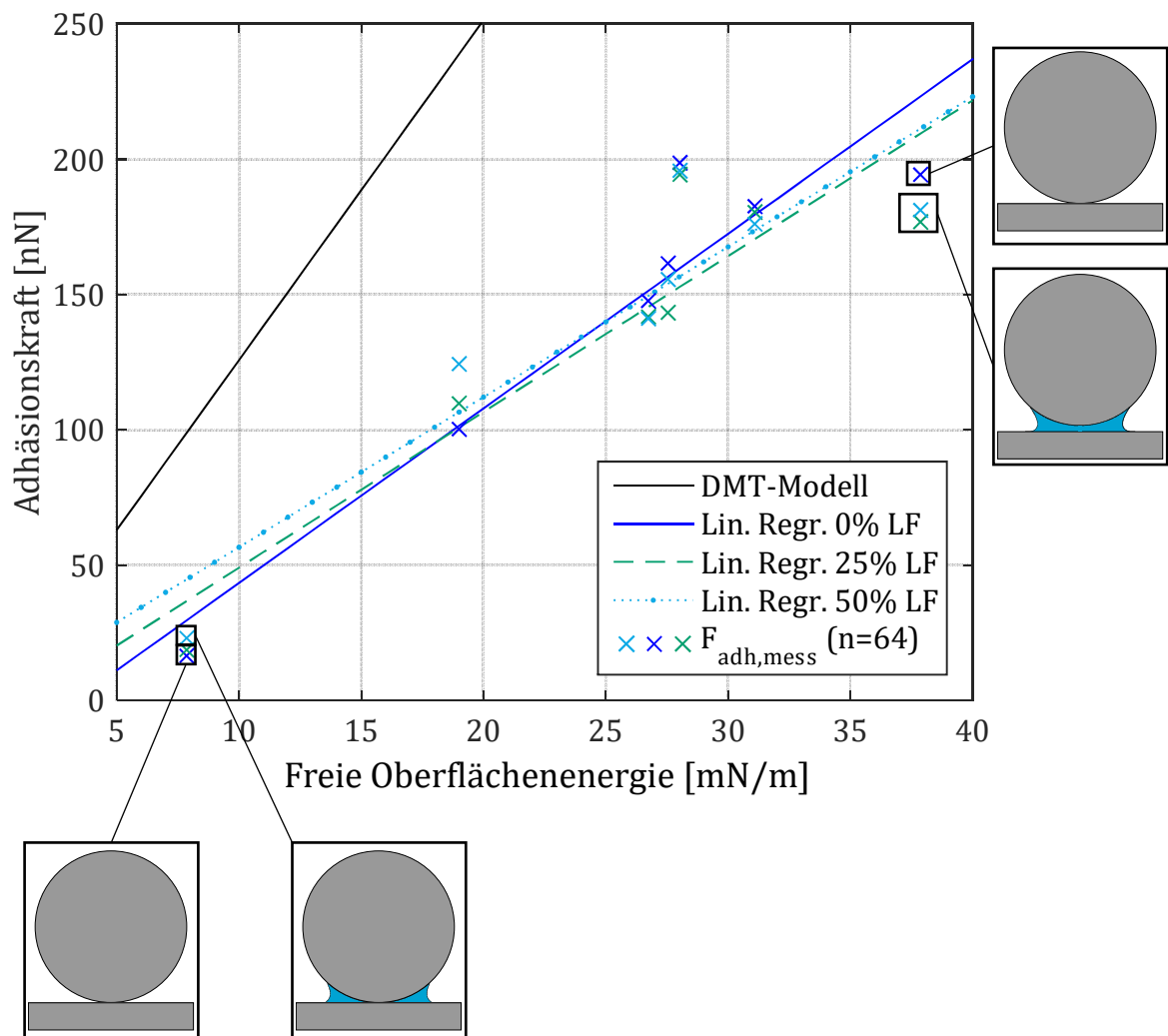


Abbildung 35: Lineare Regression der mit dem AFM an Edelstahl (E1-E4) und Silizium (Si1-Si3) gemessenen Adhäsionskraft eines sphärischen SiO_2 -Partikels ($d=2\text{ }\mu\text{m}$) bei 0%, bei 25% und bei 50% relativer Luftfeuchte (Stichprobenumfang je Probe $n=64$; Bestimmtheitsmaß der Mittelwerte an die Regression $R^2=0,90$ (0% r. F.), $R^2=0,84$ (25% r. F.), $R^2=0,84$ (50% r. F.)). Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die gemessenen Adhäsionskräfte nur marginal durch den Kapillarkraftanteil beeinflusst werden.

Als weitere Parameter, die die mit dem AFM ermittelten Adhäsionskräfte beeinflussen, können u. a. die Größe der am Cantilever befindlichen Partikel [75], deren Geometrie [79, 89] oder mögliche Beschichtungen [92] identifiziert werden.

6.5 Methodenkritik

Bei den hier untersuchten technischen Feststoffoberflächen ist nicht von einer ideal ausgebildeten Kontaktzone auszugehen. Mehrere Kontaktpunkte zwischen Partikel und Oberfläche sind denkbar, sodass sich unter Umständen an mehreren Stellen ein adhäsiver Kontakt ausbilden könnte. Dies erklärt die teilweise auftretenden großen Streuungen der Messwerte innerhalb einer Messreihe.

Bei der Vielzahl an Einzelmessungen, die zur Bestimmung der Adhäsionskraft auf den Feststoffoberflächen durchgeführt wurden, kann es zur geometrischen Veränderung des Partikels am Cantilever kommen (plastische Deformation des Partikels und somit der Kontaktzone), sodass die Messergebnisse durch die Versuchsreihenfolge beeinflusst werden könnten.

Die durchgeführten Untersuchungen eignen sich nicht, um Aussagen über das globale Adhäsionsverhalten bei technischen Proben zu treffen, da die lokale Mikrorauheit gegenüber der Makrorauheit die Adhäsionskraft überwiegend beeinflusst. Erstere ist bei nicht glatten Oberflächen über die gesamte Probe variabel, sodass nur Aussagen über den untersuchten Ort getroffen werden können. Für chemisch homogene, glatte Proben ist diese Methode daher besser geeignet. Eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Adhäsionskraftmessungen auf die Reinigungsversuche ist daher anzuzweifeln. Hinzu kommt, dass neben den Wechselwirkungen zwischen dem einzelnen Partikel und dem Substrat interpartikuläre Kräfte im Partikelkollektiv auftreten.

6.6 Zusammenfassung der Erkenntnisse

- Die mit dem AFM gemessenen Adhäsionskräfte korrelieren direkt proportional mit der freien Oberflächenenergie; die Theorie der Adhäsionskräfte kann bestätigt werden.
- Die mit dem AFM gemessenen Adhäsionskräfte sind deutlich geringer als die berechneten Werte, was auf die nicht idealen glatten und starren Bedingungen zurück zu führen ist.
- Die Adhäsionskräfte werden deutlich reduziert und streuen stärker, wenn raue Proben vorliegen.
- Die Rauheitskennwerte, welche mit verschiedenen Verfahren (AFM/LSM) ermittelt werden, sind nicht vergleichbar.
- Rauheitskennwerte, die mit dem AFM ermittelt werden, beschreiben die lokale Topographie präzise, sind jedoch bei inhomogenen Proben nicht repräsentativ.

- Die mit dem AFM ermittelte lokale Rauheit beeinflusst die gemessenen Adhäsionskräfte (Reduktion der prävalenten Adhäsionskraft) und bestätigt somit die Theorie.
- Sind Rückstände von Tensidmolekülen auf der Oberfläche vorhanden, ändert sich der oberflächenenergetische Zustand (ggf. temporär).
- Die Eigenschaften der AFM-Spitze (E-Modul, Hamakerkonstante) beeinflussen die Adhäsionskraftmessung.
- Mit der Größe der Partikel nimmt erwartungsgemäß die Kraft zu, die benötigt wird, um das Partikel von der Oberfläche zu entfernen.
- Sowohl eine Zunahme als auch eine Reduktion der Adhäsionskräfte zwischen Partikel und Feststoffoberfläche sind bei steigender relativer Luftfeuchte möglich, die Tendenz hängt von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, der Kontaktgeometrie und den freien Oberflächenenergien der Kontaktpartner ab.

7 Experimentelle Ergebnisse und Modellierung der Reinigungsversuche

Die durchgeführten Reinigungsversuche bilden die Basis für die in diesem Kapitel beschriebene Modellierung der Reinigbarkeit von Feststoffoberflächen und die Analyse der Reinigungsversuche.

Zunächst wird in Kapitel 7.1 das Vorgehen zum Aufstellen eines empirischen Modells auf Basis von den eigenen Reinigungsversuchen erläutert. In Kapitel 7.2 werden die Wirkzusammenhänge bei der Reinigung im nicht-immernierten System analysiert. Die Ergebnisse zum Einfluss der Oberflächeneigenschaften bilden die Grundlage zum Aufstellen und Überprüfen eines quantitativen Modells zur Beschreibung der Reinigbarkeit von Oberflächen im nicht-immernierten System. Die Gültigkeit des Modells für den abgesteckten Parameterraum wird mit Validierungsversuchen überprüft. Der Einfluss der Kontamination (Art, Menge) und der Prozessparameter (Reinigungsgeschwindigkeit, Anzahl der Wischhübe, Feuchte) wird stochastisch ausgewertet, diskutiert und für die qualitative Modellierung der Reinigungskinetik herangezogen.

Ziel ist es, zunächst ein Verhaltensmodell zur Reinigbarkeit von Oberflächen bei verschiedenen partikulären Kontaminationen zu erstellen, um qualitativ den Vorgang beschreiben zu können. Weiterhin soll die Frage beantwortet werden, inwiefern die Erkenntnisse aus Adhäsionskraftmessungen in Einzelpartikelversuchen einen Beitrag zum Verhaltensmodell leisten können.

7.1 Methodik der quantitativen Modellbildung

Vor dem Beginn der Modellbildung steht zunächst die Wahl einer bestimmten Modellformulierung. Diese folgt vor allem aus dem Anwendungsbereich. Da Oberflächen nicht mithilfe einer Lineareinheit mit dem dort eingestellten Anpressdruck und Geschwindigkeit gereinigt werden sowie auch die Kontamination unter praktischen Randbedingungen in Bezug auf Art und Menge von der hier verwendeten abweichen kann, ist ein vollständiges Inkludieren der von SINNER [179] genannten Parameter (vgl. Kapitel 4.3) in das quantitative Modell wenig zweckmäßig. Zur korrekten Modellierung der Reinigbarkeit von Oberflächen ist die Berücksichtigung von ausschließlich physikalischen Parametern der Oberfläche (Oberflächeneigenschaften) als sinnvoll anzunehmen. Die Untersuchung der Kontaminations- und Prozessparameter erfolgt daher semi-quantitativ, um deren Einfluss auf das Reinigungsergebnis aufzuzeigen.

Die Parametrierung des Modells erfolgt durch die Anpassung der Modellparameter an die eigenen Messdaten. Die Auswertung der Daten erfolgt softwaregestützt (Cornerstone 7.0, Fa. Camline und Matlab R2014b, Fa. MathWorks).

Das Vorgehen bei der Modellbildung ist der schematischen Darstellung in Abbildung 36 zu entnehmen.

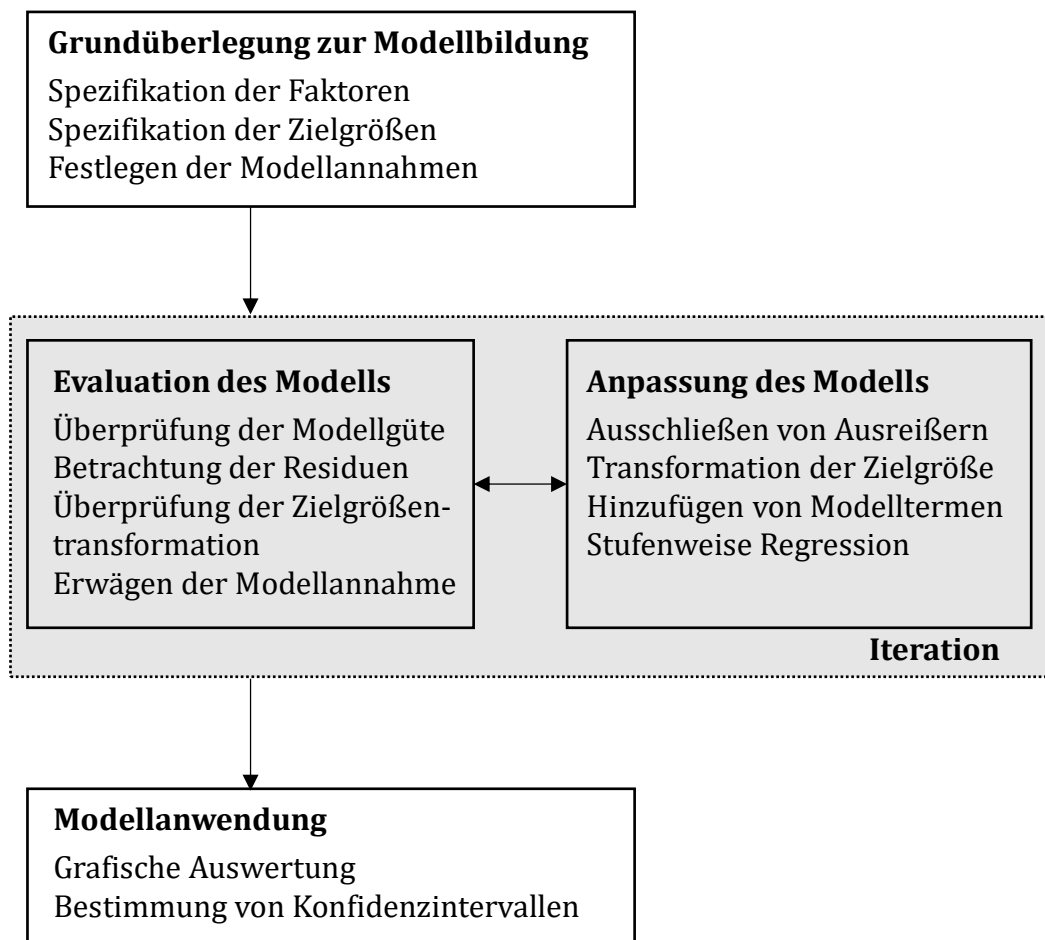


Abbildung 36: Vorgehen bei der Modellbildung

7.1.1 Grundüberlegung zur Modellbildung

Ziel ist es, mit dem Modell den funktionalen Zusammenhang zwischen den Faktoren (=Eingangsgrößen) x und den Zielgrößen y , der mit mathematisch-statistischen Methoden hergestellt werden kann, auszudrücken.

Die Eingangsparameter (=Faktoren) für das Modell werden den Kategorien Oberflächeneigenschaften, Kontamination und Reinigungsprozess zugeordnet.

Als mögliche Faktoren vonseiten der Oberflächeneigenschaften werden die folgenden berücksichtigt:

- Rauheit (R_a)
- Flächenrauheit ($R_a, \text{Fläche}$)
- Freie Oberflächenenergie (γ_s)

Der Benetzungswinkel ϑ , der Rauheitsparameter R_q und die an den Oberflächen bestimmte Adhäsionskraft F_{adh} werden nicht als Faktoren in der Modellbildung berücksichtigt, da eine statistische Unabhängigkeit dieser Faktoren von den zuvor genannten Faktoren nicht gegeben ist (vgl. Kapitel 5.1.6 und 6.1).

Vonseiten der Kontamination werden die folgenden Faktoren betrachtet:

- Art (Variation der Partikelgrößenverteilung und des mittleren Partikeldurchmessers, Form)
- Konzentration der Ausgangskontamination (Belegungsdichte)

Prozessesseitig sind folgende Faktoren denkbar:

- Reinigungsgeschwindigkeit
- Reinigungsintensität (Anzahl der Wischhübe)
- Feuchtezustand bei der Reinigung

Die Zielgröße des Modells ist die Partikelanzahl P [-], die nach der Reinigung auf der Oberfläche detektiert wird. Diese kann mit den verwendeten Verfahren in verschiedenen Größenbereichen betrachtet werden:

Partikelzähler mit Oberflächensonde	Streiflichtmessgerät
$0,3 \mu\text{m} < d \leq 0,5 \mu\text{m}$	$5 \mu\text{m} < d \leq 15 \mu\text{m}$
$0,5 \mu\text{m} < d \leq 1,0 \mu\text{m}$	$15 \mu\text{m} < d \leq 25 \mu\text{m}$
$1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$	$25 \mu\text{m} < d \leq 50 \mu\text{m}$
$3,0 \mu\text{m} < d \leq 5,0 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m} < d \leq 100 \mu\text{m}$
$5,0 \mu\text{m} < d \leq 10,0 \mu\text{m}$	$100 \mu\text{m} < d \leq 150 \mu\text{m}$
$d > 10,0 \mu\text{m}$	$150 \mu\text{m} < d \leq 200 \mu\text{m}$

Es ist anzunehmen, dass das Systemverhalten für die zu untersuchenden Zusammenhänge nicht ausschließlich über lineare Abhängigkeiten beschrieben werden kann. Das Abbilden der Nichtlinearitäten und Wechselwirkungen zwischen den Faktoren soll über ein Modell höherer Ordnung (vgl. Gleichung (32)) grundsätzlich ermöglicht werden. Das Polynom wird durch eine Konstante β_0 sowie k lineare ($\beta_i x_i$) bzw. quadratische Terme ($\beta_i x_i^2$) und einen Wechselwirkungsanteil $\beta_{ij} x_i x_j$ beschrieben. Der Fehleranteil (=Residuum), der das tatsächliche Systemverhalten beschreibt, ist mit ε berücksichtigt.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (32)$$

Das an die Daten angepasste Modell wird analog durch das Regressionspolynom in Gleichung (33) mithilfe der Konstanten b_0 und Koeffizienten b_i bzw. b_{ij} beschrieben.

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j \quad (33)$$

Zur Abbildung von nichtlinearen Zusammenhängen sind Messdaten mit mindestens drei Faktorstufen innerhalb des Versuchsraumes in sinnvollem Stufenabstand zu erzeugen. Da die berücksichtigten Faktoren der Oberflächeneigenschaften an den gewählten Proben nicht präzise einstellbar sind, resultiert über den gesamten Versuchsraum eine feinere Auflösung.

7.1.2 Evaluation und iterative Anpassung des Modells

Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Zur Abschätzung der einzelnen Regressionskoeffizienten wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Das Prinzip der kleinsten Quadrate verlangt, dass die Summe der Quadrate der Residuen ε (=Differenz zwischen Messdaten y_i und Modell \hat{y}_i) bei n Messungen den kleinstmöglichen Wert annimmt [13]:

$$\sum \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min \quad (34)$$

Test auf Normalverteilung und Datentransformation

Bei der Regressionsanalyse wird vorausgesetzt, dass die Residuen normalverteilt und stochastisch unabhängig sind [210].

Im Rahmen der Auswertung werden studentisierte Residuen ε_i^* untersucht, um Messdaten identifizieren zu können, die vom Erwartungswert betragsmäßig um ein Vielfaches der Standardabweichung abweichen (Identifikation potentieller Ausreißer).

Nach BELSEY, KUH und WELSCH [8] gilt:

$$\varepsilon_i^* = \frac{\varepsilon_i}{s(i)\sqrt{1-h_i}} \quad (35)$$

mit h_i als Leverage-Wert und $s(i)$ als Standardabweichung der geschätzten Residuen. Sind die studentisierten Residuen normalverteilt, ist von einer adäquaten Modellanpassung auszugehen. Dies wird mit einem Wahrscheinlichkeitsnetz für jeden Datensatz überprüft. Beim Vorliegen von normalverteilten Residuen muss sich im Wahrscheinlichkeitsnetz eine Summengerade durch die Daten legen lassen [65]. In Abbildung 37 wird exemplarisch ein Wahrscheinlichkeitsnetz zum Test auf Normalverteilung der untransformierten Messwerte gezeigt. Eine Normalverteilung liegt nicht vor.

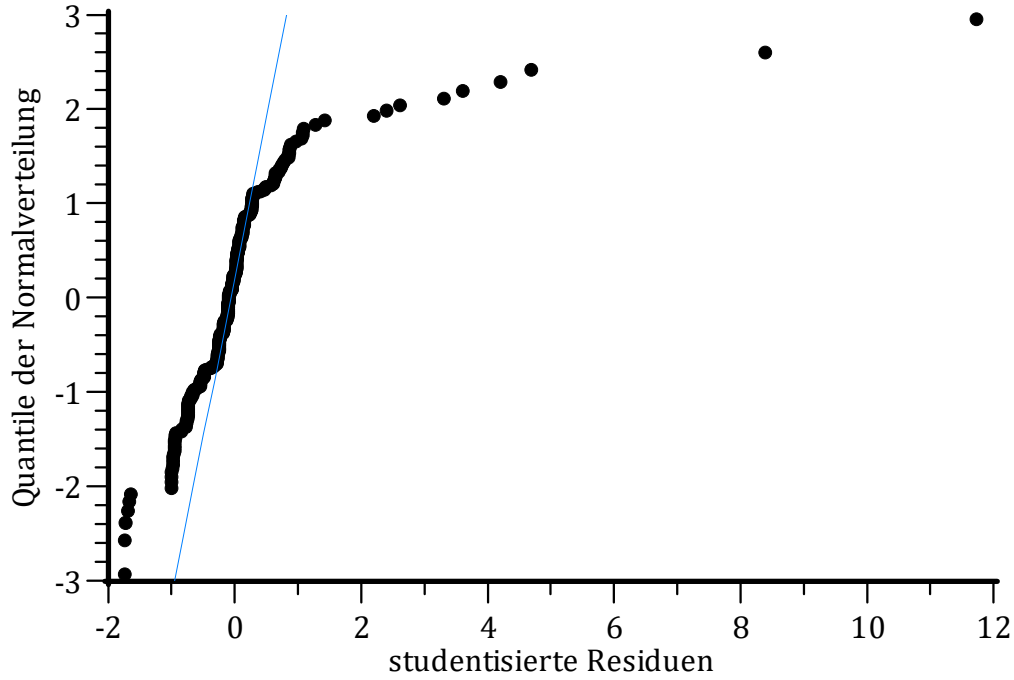


Abbildung 37: Wahrscheinlichkeitsnetz zum Test auf Normalverteilung für die untransformierte Partikelanzahl (exemplarische Darstellung des Größenkanals $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler, $n=307$)

Handelt es sich – wie in Abbildung 37 – nicht um normalverteilte Größen, ist die Transformation von der Zielgröße in Betracht zu ziehen, um die Schiefe der Verteilung auszugleichen. Eine gleichzeitige Verbesserung der Modellgüte sowie eine Stabilisierung der Varianz können somit erreicht werden [24]. Ob und welche Transformation der Zielgröße zu einem signifikant besseren Ergebnis führt, wird nach dem Verfahren von BOX und COX [18] geprüft. Hierfür wird die Transformationsfunktion (Gl. (36)) angewendet:

$$y_{\text{transformiert}} = y^{\lambda_T} \quad (36)$$

und der Transformationsparameter λ_T unter Anwendung des Algorithmus (Gl. (37)) optimiert:

$$y^{\lambda_T} = \begin{cases} \frac{y^{\lambda_T} - 1}{\lambda_T} & (\lambda_T \neq 0) \\ \log y & (\lambda_T = 0) \end{cases} \quad (37)$$

Die einfache Zielgrößentransformation wird mit $\lambda_T=-1$ (inverse Transformation), $\lambda_T=-0,5$ (inverse Wurzeltransformation), $\lambda_T=0$ (logarithmische Transformation) oder $\lambda_T=0,5$ (Wurzeltransformation) geprüft.

Bei einer geeigneten Transformation der Daten sind diese im Anschluss normalverteilt. Dies ist bei den vorliegenden Daten nach der logarithmischen Transformation der Zielgröße gegeben (vgl. Abbildung 38).

Um die logarithmische Messdatentransformation zu ermöglichen, ist es erforderlich, ein Offset von $k_0=0,1$ (entspricht 10% der Nachweisgrenze) auf alle Datenpunkte zu addieren, da Versuche, bei denen kein Partikelrückstand ($P=0$) vorhanden ist, sonst nicht ausgewertet werden können.

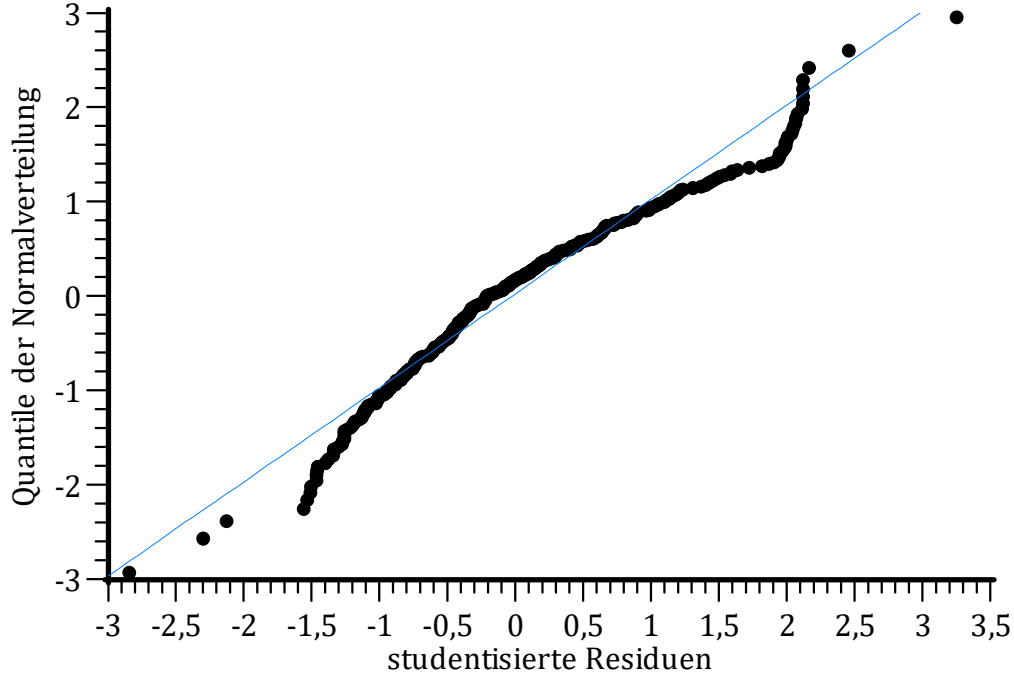


Abbildung 38: Wahrscheinlichkeitsnetz zum Test auf Normalverteilung für die transformierte Partikelanzahl (exemplarische Darstellung des Größenkanals $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler, $n=307$)

Da die Koeffizienten auf Basis transformierter Werte bestimmt wurden, ist eine Rücktransformation der Zielgröße im Anschluss notwendig, um reale Beobachtungen mit dem Modell erklären zu können.

Die Modellfunktion aus Gleichung (33) nimmt nach der Rücktransformation die allgemeine Form in Gleichung (38) an. Neben der Anwendung der Umkehrfunktion muss die gegebenenfalls addierte Konstante k_0 zur Durchführung der Transformation subtrahiert werden.

$$\hat{y} = e^{b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j} - k_0 \quad (38)$$

Anschließend werden die individuellen Modellterme hinsichtlich ihrer statistischen Signifikanz untersucht und werden i. d. R. nur in das Modell implementiert, wenn sie ein Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ nicht überschreiten und zu einer Verbesserung des adjustierten Bestimmtheitsmaßes führen. Das berechnete Signifikanzniveau der einzelnen Faktoren wird jeweils angegeben und wird zu null gesetzt, wenn $\alpha < 10^{-15}$ beträgt.

Gütebewertung und Modellannahmen

Die Modellgüte wird über ein Bestimmtheitsmaß beurteilt. Da das Bestimmtheitsmaß R^2 umso größer wird, je größer die Zahl der unabhängigen Variablen ist, wird das adjustierte Bestimmtheitsmaß R_{adj}^2 zur Überprüfung angewendet. Dieses berechnet sich wie folgt:

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n - c}{FG} \right) \quad (39)$$

Hierbei ist R^2 das Bestimmtheitsmaß für lineare Regressionsmodelle, n der Stichprobenumfang, c nimmt den Wert $c=1$ an, wenn ein konstanter Term im Modell vorliegt, ansonsten ist $c=0$; FG ist die Anzahl der Freiheitsgrade, welche den um die Anzahl der zu schätzenden Parameter reduzierten Stichprobenumfang entspricht. Je mehr FG , umso höher ist folglich die Anzahl der unabhängigen Größen, die zur Bestimmung der Koeffizienten genutzt wurde. Ohne die Berücksichtigung der FG kann durch das Inkludieren weiterer, auch nicht signifikanter Terme ein unzulässig hohes Bestimmtheitsmaß erreicht werden. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß wird gemäß Gleichung (39) nicht zwingend größer mit zunehmender Anzahl an unabhängigen Variablen und eignet sich daher besser zur realistischen Beurteilung der Modellgüte, wenn es sich um nicht-lineare Systeme handelt. Eine gute Anpassung des Modells wird bei $R_{adj}^2 > 0,75$ angenommen.

Ausgangspunkt für die Modellbildung bilden zunächst lineare Systeme. In weiteren Iterationsschritten werden polynomiale Systeme bis zur zweiten, in einigen Ausnahmen auch bis zur dritten Ordnung untersucht. Lineare Wechselwirkungen der Parameter untereinander werden in weiteren Iterationsschritten berücksichtigt.

Extreme Messwerte können vereinzelt aufgrund von Messfehlern oder einzelner Probleme im Versuchsaufbau resultieren. Daher werden die vorliegenden Daten auf Ausreißer überprüft.

Die Residuen sollten stochastisch unabhängig sein, um eine gute Parameteridentifikation und -schätzung zu ermöglichen [185]. Ausreißer, die beispielsweise durch Fehler beim Versuch resultieren, liegen in den von den Versuchen erstellten Streudiagrammen (vgl. exemplarische Abbildung 39) nicht vor. Auch analytisch werden keine Ausreißer festgestellt. Die Residuen streuen weitestgehend homogen im Bereich bis zu zwei Standardabweichungen um den Erwartungswert. Dies lässt vermuten, dass im Versuch keine systematischen Fehler gemacht und die signifikanten Faktoren für das Modell identifiziert wurden.

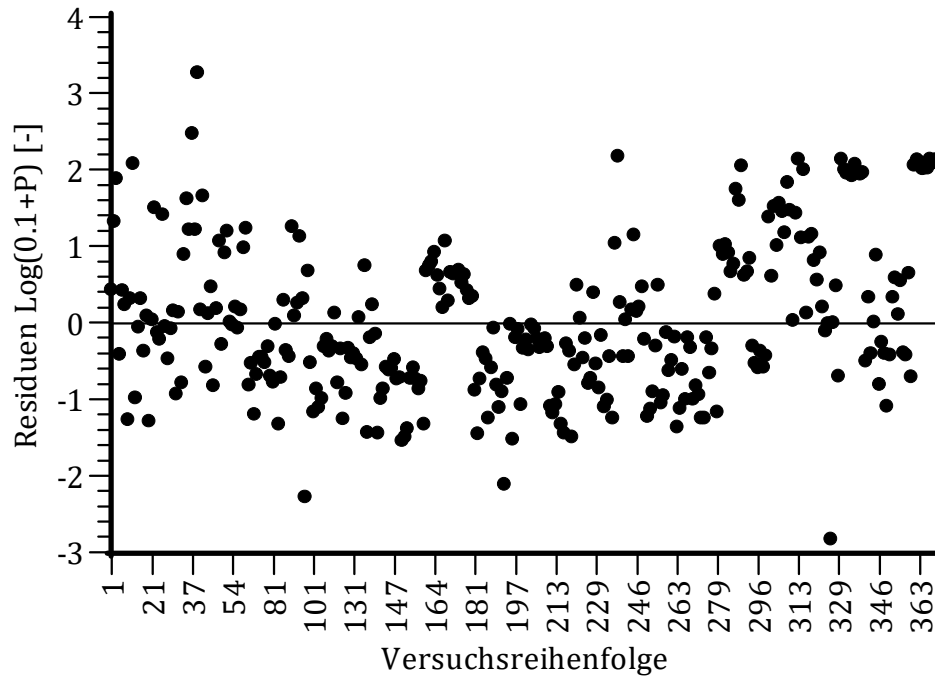


Abbildung 39: Streudiagramm zur Ausreißeranalyse des Gesamtmodells (exemplarische Darstellung des Größenkanals $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler, $n=307$)

7.1.3 Modellanwendung und -validierung

Für das zugrundeliegende Modell werden die 95%-Konfidenzbänder berechnet. Zwei Probekörper aus zwei verschiedenen Materialgruppen werden zur Modellvalidierung genutzt, indem die nach dem Modell berechneten Werte mit den gemessenen Werten verglichen werden. Die Messwerte der Validierungsversuche müssen innerhalb des kalkulierten Konfidenzintervalls liegen.

7.2 Modellierung der Reinigung im nicht-immernierten System

7.2.1 Einfluss der Oberflächeneigenschaften bei partikulärer Kontamination

Feine partikuläre Kontamination

Partikel, deren Durchmesser $d \leq 5 \mu\text{m}$ beträgt, werden als feine Kontamination betrachtet. Innerhalb der einzelnen Materialgruppen ist die Rauheit R_a der signifikante Einflussparameter. Das beschriebene Verhalten ist exemplarisch anhand des Größenkanals $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ der Polymerprobengruppe in Abbildung 40 dargestellt. Die Koeffizienten b_i und deren Signifikanzniveaus α der Partikelgrößenkanäle sind in Tabelle 15 gegeben. Es kann gezeigt werden, dass mit steigender Rauheit mehr Partikel auf den Polymerproben zurückbleiben. Dieses Verhalten wird ebenso bei den Proben der Kategorien Edelstahl, Betonbeschichtung und Kupferlegierung festgestellt. Die vollständigen Ergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen.

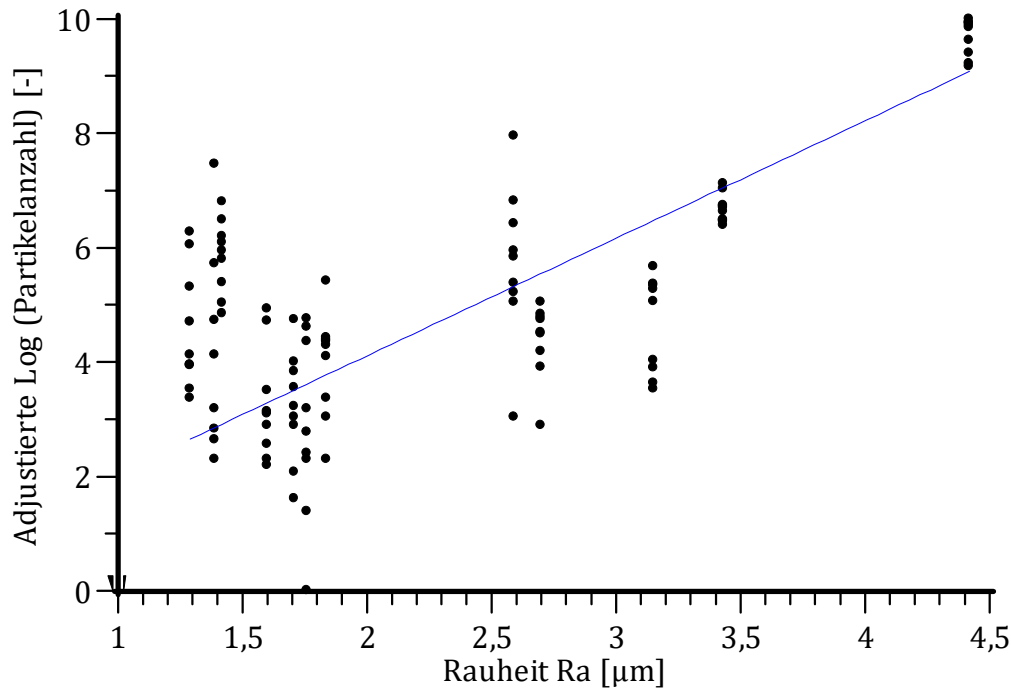


Abbildung 40: Adjustierter Antwortgraph des Größenkanals $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler für den Faktor Rauheit der Polymerproben ($R_{adj}^2=0,91$, $n=108$)

Tabelle 15: Koeffizienten und Signifikanzniveau α des Systemverhaltens innerhalb der Materialgruppe der Polymerproben

Größenkanal	0,3 µm < d ≤ 0,5 µm		0,5 µm < d ≤ 1,0 µm		1,0 µm < d ≤ 3,0 µm	
	b	α	b	α	b	α
R_a [µm]	3,3542	0	2,3935	0	2,0545	0
R_{adj}^2	0,94		0,94		0,91	

Das Verhaltensmodell innerhalb einer Materialgruppe kann mithilfe der Gleichung (40) beschrieben werden. Der tatsächlich vorliegende Partikelrückstand P wird mit \hat{P} abgeschätzt:

$$\hat{P} = e^{R_a \cdot b_i} - k_0 \quad (40)$$

Hierbei kann der Partikelrückstand mithilfe einer Exponentialfunktion beschrieben werden, deren Verlauf über den Koeffizienten b_i und die Rauheit R_a [µm] bestimmt wird (mit $k_0 = 0,1$).

In der Regel wird in den feinen Größenkanälen eine größere Partikelanzahl als in den gröberen Größenkanälen detektiert. Dies ist unter anderem auf die Partikelgrößenverteilung der Ausgangskontamination zurück zu führen, da mehr kleine Partikel initial aufgegeben wurden. Auch anteilig werden mehr feine Partikel nach der Reinigung detektiert.

Bei zunehmendem Partikeldurchmesser nimmt der Koeffizient b_i absolut ab. Je größer die betrachtete Kontamination, umso geringer ist folglich der Einfluss der Rauheit auf das Reinigungsergebnis. Viele feine Partikel könnten in den Vertiefungen der Oberfläche zurückbleiben ohne dass sie mechanisch durch den Reinigungsschlitten erfasst werden. Für größere Partikel besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit beim Wischvorgang erfasst zu werden, da sie nicht vollständig geschützt in den Vertiefungen liegen. Der Einfluss der Rauheit ist daher weniger deutlich im Systemverhalten erkennbar.

Sollen die einzelnen Materialgruppen miteinander verknüpft werden, hat neben dem Rauheitsparameter R_a auch die freie Oberflächenenergie γ_s und ein Wechselwirkungsparameter der beiden Faktoren einen signifikanten Einfluss auf den Partikelrückstand nach der Reinigung. Die adjustierten Antwortgraphen für die beiden genannten Parameter sind exemplarisch für den Größenkanal $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ in Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt. Adjustierte Antwortgraphen zeigen den Zusammenhang zwischen einem Faktor, der um den Einfluss der anderen Faktoren bereinigt wird, und der Zielgröße. Erläuterungen zu den Berechnungen, die zur Erstellung des adjustierten Antwortgraphens (adjustierte Fit-Funktion und adjustierte Datenpunkte) benötigt werden, sind Anhang D zu entnehmen.

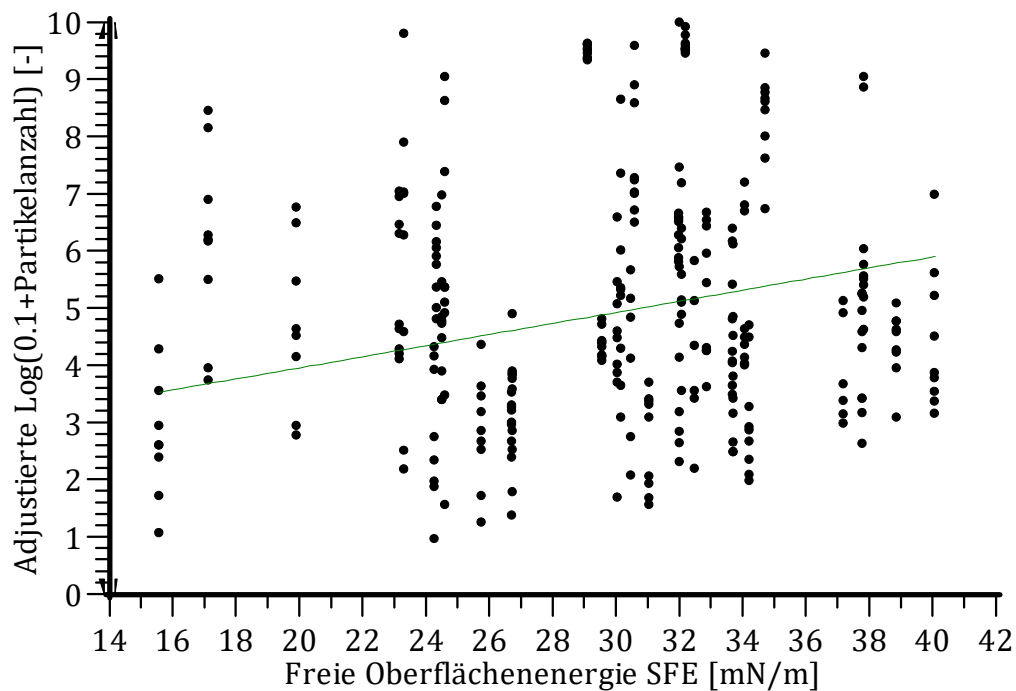


Abbildung 41: Adjustierter Antwortgraph des Größenkanals $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler für den Faktor freie Oberflächenenergie des Gesamtmodells ($n=307$)

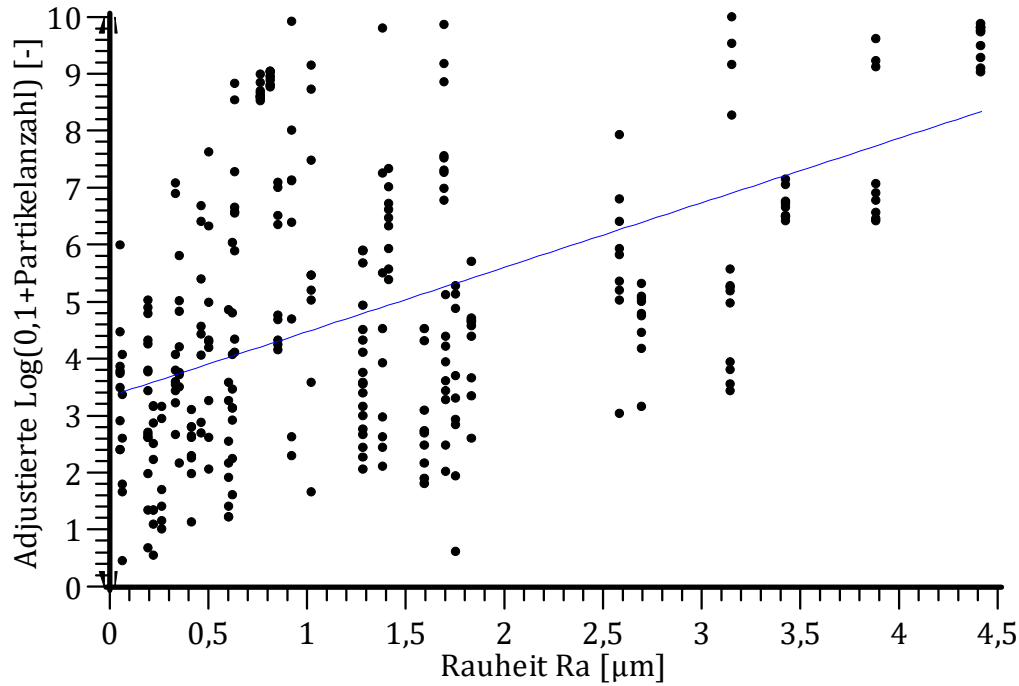


Abbildung 42: Adjustierter Antwortgraph des Größenkanals $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler für den Faktor Rauheit des Gesamtmodells ($n=307$)

Bei den durchgeführten Reinigungsexperimenten zeigt sich, dass mit zunehmender freier Oberflächenenergie die Restpartikelmenge nach der Reinigung ansteigt. Die freie Oberflächenenergie beeinflusst als Materialkonstante die Wechselwirkungen zwischen Partikel und Oberfläche (vgl. JKR- bzw. DMT-Theorie in Gleichung (23) bzw. (24) sowie eigene Ergebnisse in Abbildung 23). Dies deutet darauf hin, dass neben der mechanischen Komponente die adhäsiven Wechselwirkungen zwischen Partikel und Oberfläche einen signifikanten Einfluss auf den Erfolg eines Reinigungsvorganges haben. Zudem steht der Einflussfaktor Rauheit mit dem Einflussfaktor freie Oberflächenenergie in Wechselwirkung.

Es konnte festgestellt werden, dass mit zunehmender Partikelgröße die Rauheit die Restpartikelmenge zunehmend stärker beeinflusst als die freie Oberflächenenergie. Dies weist darauf hin, dass die mechanischen Größen gegenüber den oberflächenphysikalischen Wechselwirkungen zunehmend dominieren. Dies wird durch die Theorie der Adhäsionskräfte bestätigt, welche besagt, dass bei zunehmendem Partikeldurchmesser die Gewichtskraft zunehmend relevanter bei der Einzelpartikelablösung wird.

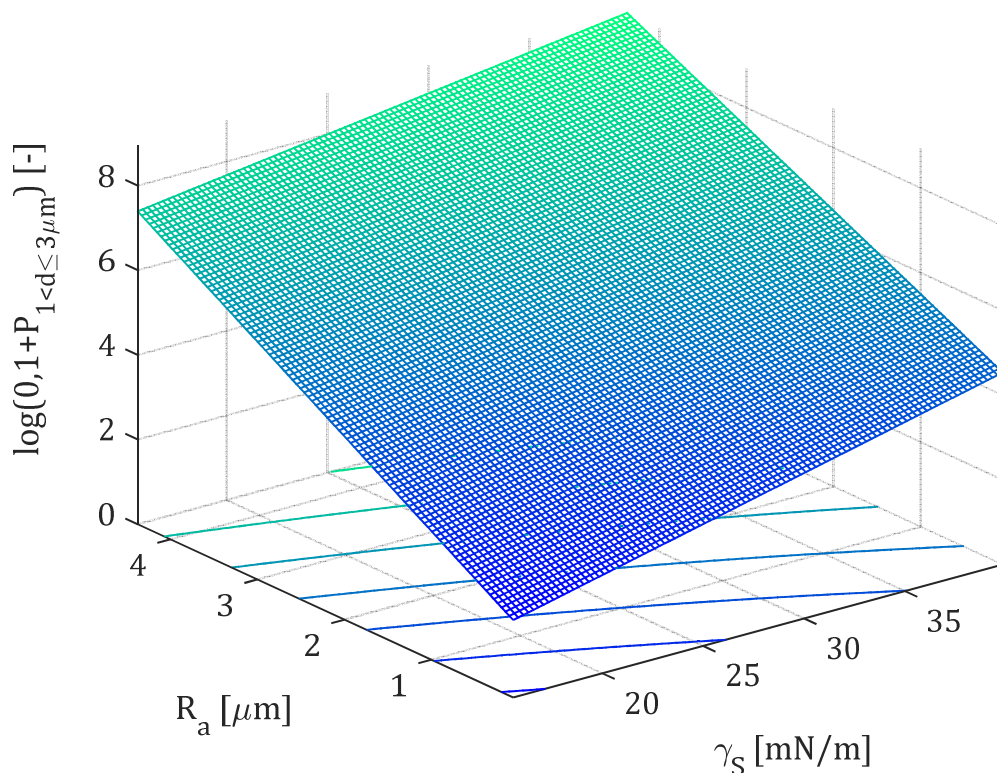
Das Verhaltensmodell des Gesamtsystems kann mit Gleichung (41) beschrieben werden. Hierbei sind die Koeffizienten für die Rauheit R_a , die freie Oberflächenenergie γ_s und den Wechselwirkungsparameter $R_a \cdot \gamma_s$ der Tabelle 16 zu entnehmen. Für die Konstante gilt $k_0 = 0,1$.

$$\hat{P} = e^{b_i \cdot R_a + b_j \cdot \gamma_s + b_{ij} \cdot R_a \cdot \gamma_s} - k_0 \quad (41)$$

Tabelle 16: Koeffizienten b und Signifikanzniveau α für das Systemverhalten im Gesamtmodell

Größenkanal	0,3 $\mu\text{m} < d \leq 0,5 \mu\text{m}$		0,5 $\mu\text{m} < d \leq 1,0 \mu\text{m}$		1,0 $\mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$	
	b	α	b	α	b	α
$R_a [\mu\text{m}]$	5,0120	0	2,5161	$3 \cdot 10^{-5}$	1,4622	0,02
$\gamma_S [\text{mN/m}]$	0,2300	0	0,1390	0	0,1123	0
$R_a \cdot \gamma_S [\text{nN}]$	-0,1291	$2 \cdot 10^{-11}$	-0,044	0,02	-0,0111	0,58
R_{adj}^2	0,94		0,89		0,84	

Wird das Systemverhalten aller Materialgruppen bei den Reinigungsversuchen grafisch dargestellt, ergibt sich eine gekrümmte Fläche innerhalb der betrachteten Faktorgrenzen (vgl. Abbildung 43). Die grafische Darstellung des Verhaltensmodells der anderen Partikelgrößenkanäle, die mit der Oberflächensonde untersucht werden, sind dem Anhang zu entnehmen.


Abbildung 43: Verhaltensmodell des Größenkanals $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler ($n=307$, $R_{adj}^2=0,84$)

Grobe partikuläre Kontamination

Partikel, deren Durchmesser $5 \mu\text{m}$ überschreiten, werden mit dem Streiflichtmessgerät erfasst. Analog zu den feinen Partikeln ergibt sich bei der Kontamination A3 ein signifi-

kanter Einfluss der Rauheit auf die Reinigbarkeit der Oberfläche innerhalb der untersuchten Materialgruppen (Edelstahl-, Polymer- und Kupferproben; Tabellen und Abbildungen im Anhang). Darüber hinaus beeinflusst die Beleuchtungsintensität I , die je nach optischen Eigenschaften der Feststoffoberfläche eingestellt wird, die gemessene Restpartikelmenge signifikant.

Werden alle untersuchten Materialgruppen in einem Gesamtmodell für ein grobes Partikelsystem zusammengefasst, sind die freie Oberflächenenergie, die Rauheit und die Intensität die signifikanten Einflussfaktoren auf die gemessene Restpartikelmenge. Die Zusammenhänge zwischen Oberflächeneigenschaften und Partikelanzahl ist exemplarisch für den Partikelgrößenkanal $15\text{ }\mu\text{m} < d \leq 25\text{ }\mu\text{m}$ bei der Kontamination A3 in Abbildung 44 und Abbildung 45 dargestellt. Beide Kenngrößen sollten möglichst niedrig sein, um einen geringen Partikelrückstand nach der Reinigung zu gewährleisten. Ein Wechselwirkungsparameter zwischen der freien Oberflächenenergie und der Rauheit ist für Partikel mit $d > 5\text{ }\mu\text{m}$ im Gesamtmodell nicht signifikant. Im Vergleich zu den feinen Partikelgrößenkanälen ($d \leq 3,0\text{ }\mu\text{m}$) nimmt der Einfluss der freien Oberflächenenergie gegenüber dem Einfluss der Rauheit auf die Restpartikelmenge deutlich ab. Die Rauheit hat gegenüber der freien Oberflächenenergie einen deutlich größeren Einfluss auf die Reinigbarkeit der Oberfläche (vgl. Abbildung 43 und Abbildung 46). Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, kann bei groben Partikeln festgestellt werden, dass die interpartikulären Wechselwirkungen im Vergleich zu den mechanischen Einflussfaktoren die Reinigungsprozesse nur geringfügig beeinflussen.

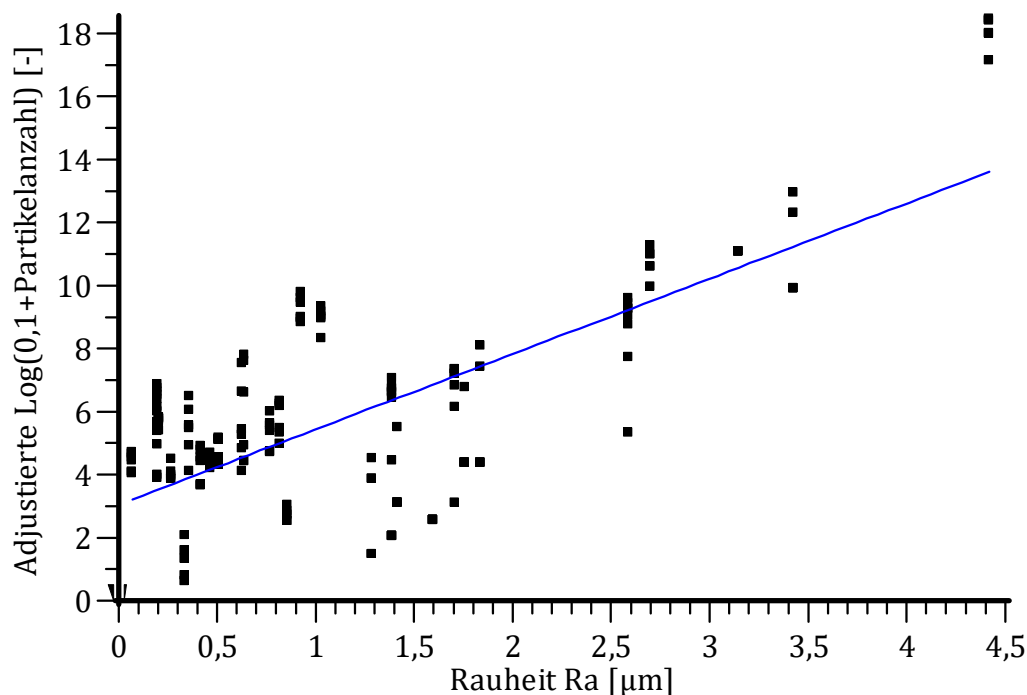


Abbildung 44: Adjustierter Antwortgraph des Größenkanals $15\text{ }\mu\text{m} < d \leq 25\text{ }\mu\text{m}$ bei der Kontamination A3 detektiert mit dem Streiflichtmessgerät für den Faktor Rauheit des Gesamtmodells ($n=182$)

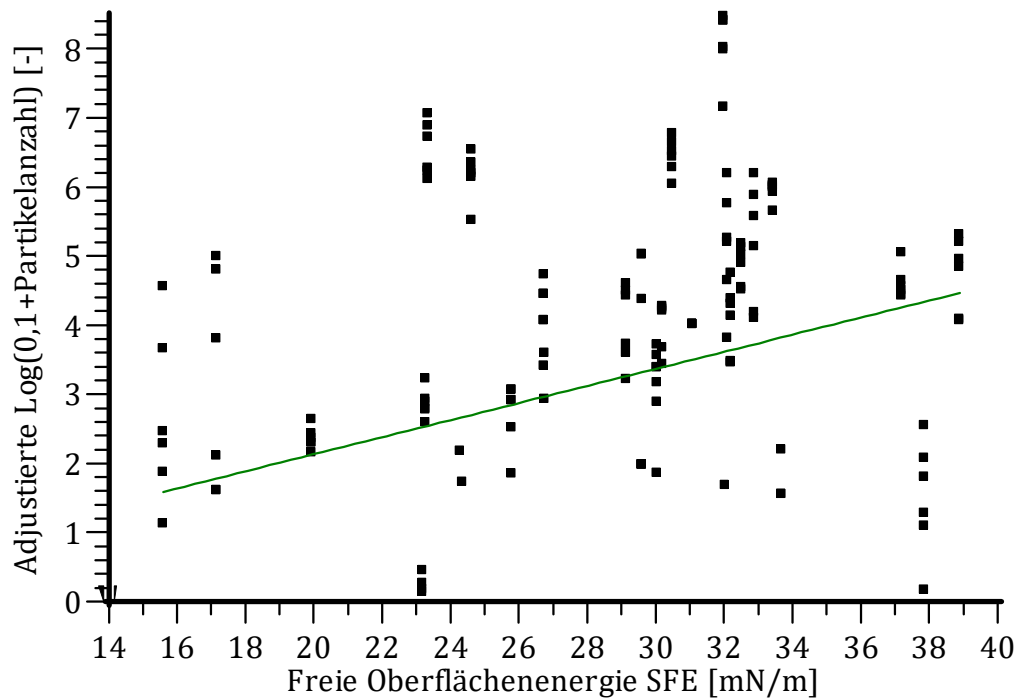


Abbildung 45: Adjustierter Antwortgraph des Größenkanals $15 \mu\text{m} < d \leq 25 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A3 detektiert mit dem Streiflichtmessgerät für den Faktor freie Oberflächenenergie des Gesamtmodells ($n=182$)

Tabelle 17: Koeffizienten b und Signifikanzniveau α für das Systemverhalten im Gesamtmodell bei der Kontamination A3

Größenkanal	$5 \mu\text{m} < d \leq 15 \mu\text{m}$		$15 \mu\text{m} < d \leq 25 \mu\text{m}$		$25 \mu\text{m} < d \leq 50 \mu\text{m}$	
	b	α	b	α	b	α
$R_a [\mu\text{m}]$	-2,1989	$1 \cdot 10^{-13}$	-2,1743	$2 \cdot 10^{-12}$	-2,3791	$2 \cdot 10^{-13}$
$\gamma_s [\text{mN/m}]$	0,1326	0	0,-1235	$2 \cdot 10^{-13}$	0,1281	$3 \cdot 10^{-13}$
$I [-]$	-0,0422	0,05	-0,0323	0,15	-0,0424	0,07
$R_a I [\mu\text{m}]$	0,2893	$4 \cdot 10^{-12}$	0,2856	$6 \cdot 10^{-11}$	0,3185	$3 \cdot 10^{-12}$
R_{adj}^2	0,76		0,74		0,74	

Das Verhaltensmodell im Gesamtsystem an groben Partikeln mittels Streiflichtmessgerät kann wie mit der Gleichung (42) beschrieben werden. Exemplarisch ist das Verhaltensmodell für das Gesamtsystem für den Größenkanal $15 \mu\text{m} < d \leq 25 \mu\text{m}$ in Abbildung 46 dargestellt.

$$\hat{P} = e^{b_i \cdot R_a + b_j \cdot \gamma_s + b_k \cdot I + b_{ik} \cdot R_a \cdot I} - k_0 \quad (42)$$

Für die Partikelgrößenkanäle $5 \mu\text{m} < d \leq 15 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m} < d \leq 25 \mu\text{m}$ und $25 \mu\text{m} < d \leq 50 \mu\text{m}$ sind die Rauheit $R_a [\mu\text{m}]$, die freie Oberflächenenergie $\gamma_s [\text{mN/m}]$ und die probenabhängige Beleuchtungsintensität $I [-]$ zu berücksichtigen, um die Restpartikelmenge nach der Reinigung zu bestimmen. Es gibt einen Wechselwirkungsparameter zwischen der Rauheit und der Beleuchtungsintensität, der vermutlich darauf zurück zu führen ist, dass

raue Feststoffoberflächen Licht anders streuen als glatte Oberflächen. Die Signifikanzniveaus α und die Koeffizienten b mit denen das gesamte Systemverhalten bei der Kontamination A3 beschrieben werden kann, ist in Tabelle 17 gegeben. Die Signifikanzniveaus und Koeffizienten der anderen Kontaminationen sind qualitativ vergleichbar und daher ebenso dem Anhang zu entnehmen.

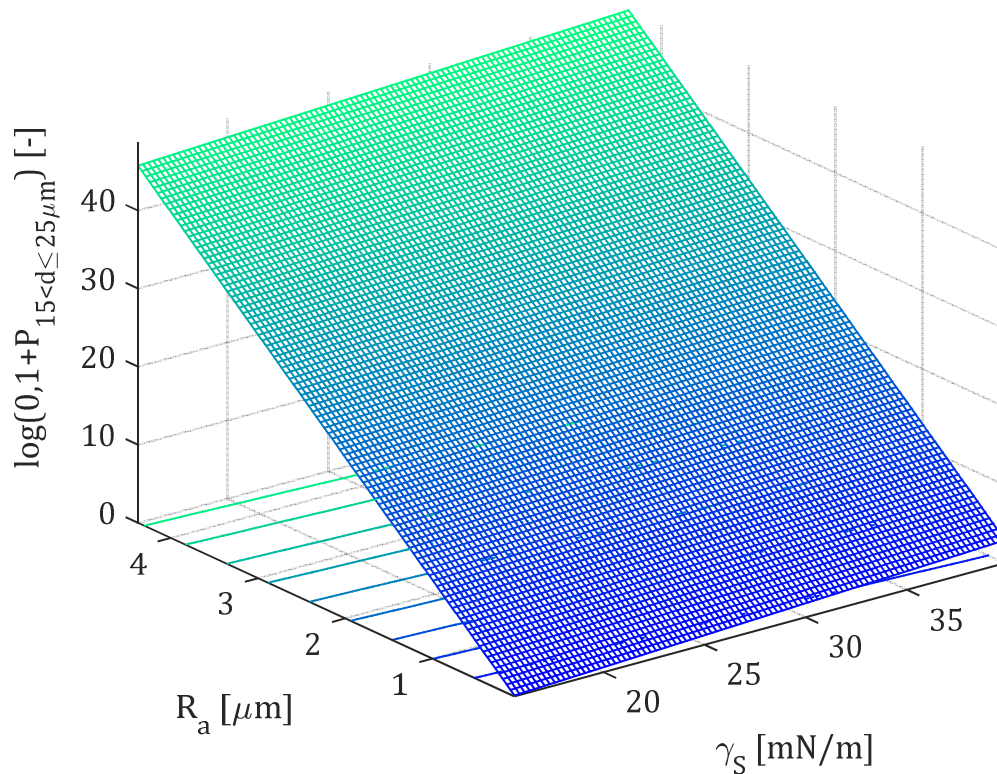


Abbildung 46: Verhaltensmodell des Größenkanals $15 \mu\text{m} < d \leq 25 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A3 detektiert mit dem Streiflichtmessgerät (Beleuchtungsintensität=45, $n=182$, $R_{adj}^2=0,74$)

Exkurs: Geometrisch bedingte Übergänge

Unter praktischen Gesichtspunkten ist es notwendig, auch die Reinigbarkeit von Materialübergängen zu bewerten. Daher wurde auf einem Fugenkreuz eine Kontamination (KSL) aufgetragen und der Rückstand nach der Reinigung qualitativ beurteilt. Da bei geometrischen Übergängen weder die Oberflächensonde noch das Streiflichtmessgerät sinnvoll einzusetzen sind, wurde die Feststoffoberfläche nach der Reinigung mit UV-Licht beaufschlagt, um die Kontamination eindeutig von der Oberfläche unterscheiden zu können (vgl. Abbildung 47). Es kann gezeigt werden, dass ein Großteil der Kontamination in der Fuge zurückbleibt. Dies ist neben unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften in Fuge und Fliese darauf zurück zu führen, dass kein geometrisch ebener Materialübergang gegeben ist.

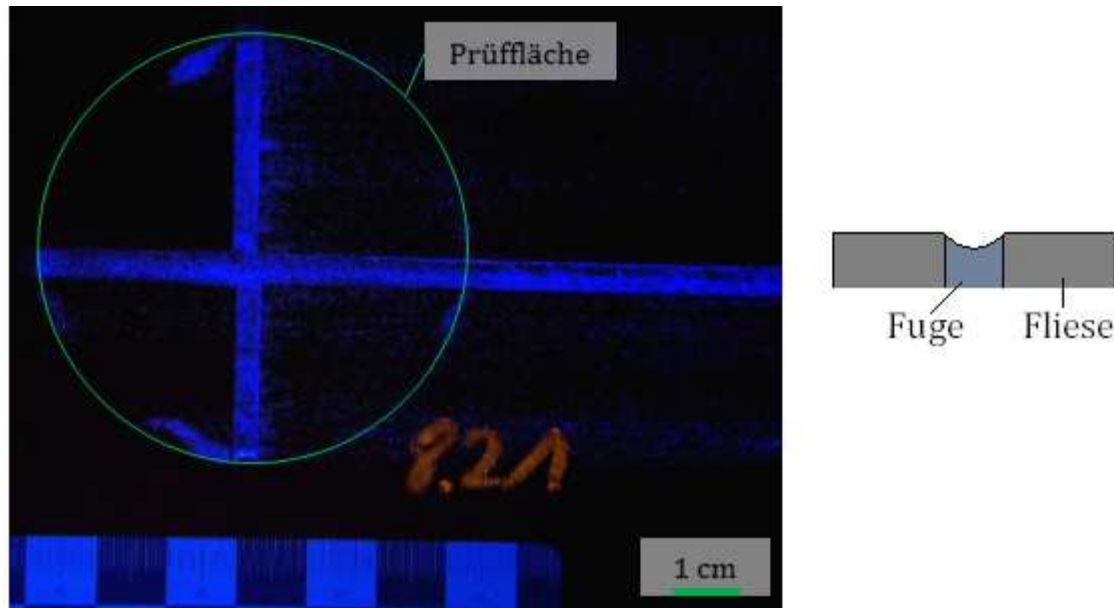


Abbildung 47: Kontamination (blau fluoreszierend) in einem Fugenkreuz nach der Reinigung sowie schematische Darstellung der Fugegeometrie

7.2.2 Einfluss der Kontamination

Zusammensetzung der partikulären Kontamination

Der Einfluss der Kontamination auf die Reinigbarkeit der Oberfläche wurde mithilfe der Kontaminationen A1, A2_fein, A2, A3 und KSL untersucht. Im Einzelpartikelversuch wurde festgestellt, dass die Partikelgröße einen Einfluss auf die gemessene Adhäsionskraft zwischen Partikel und Feststoffoberfläche hat. Demzufolge ist bei unterschiedlichen Eigenschaften der Partikelsysteme ein quantitativ abweichendes Verhalten bei der Reinigung zu erwarten.

Diese These konnte auf Edelstählen mittels Oberflächensonde mit angeschlossenem Partikelzähler bestätigt werden, da sich die Kontaminationen A1 und A2_fein signifikant von den gleichen Oberflächen abreinigen lassen. Dies zeigt die Abbildung 48, wobei die Zielgröße Restpartikelanzahl P der diskreten Variablen (A1, A2_fein) in Boxplots aufgetragen werden. Die Box schließt die Daten vom 25% bis 75% Perzentil ein. Die Verbindungslinie zwischen den Variablen verdeutlicht den Unterschied zwischen den Medianen der Messdaten. Neben der Kontamination beeinflusst – wie oben beschrieben – die Probe mit ihren Oberflächeneigenschaften das Reinigungsergebnis signifikant (Tabelle 18, Koeffizienten und grafische Darstellung werden hier nicht gezeigt). Mit dem Streiflichtmessverfahren kann dieses Ergebnis analog mit den Kontaminationen A2, A3 und KSL gezeigt werden (vgl. Abbildung 49, Tabelle 19). Hierbei sind zudem die optischen Eigenschaften der Feststoffoberfläche (Intensität I [-] der Beleuchtung) und die der Kontamination (Schwellwert S [-] zur Detektion als Kontamination) signifikant. Da die optischen Eigenschaften der Proben und der Kontaminationen variieren, ist die ermittelte Signifikanz plausibel.

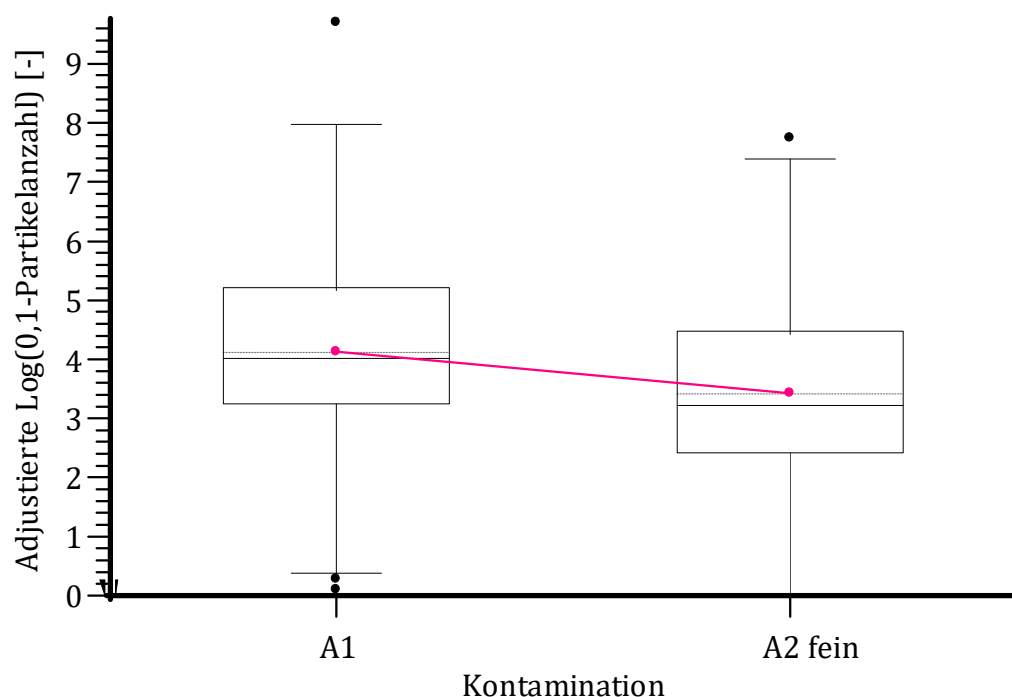


Abbildung 48: Adjustierter Antwortgraph des Größenkanals $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ von Edelstählen bei der Kontamination A1 und A2_{fein} detektiert mit dem Partikelzähler ($n=153$)

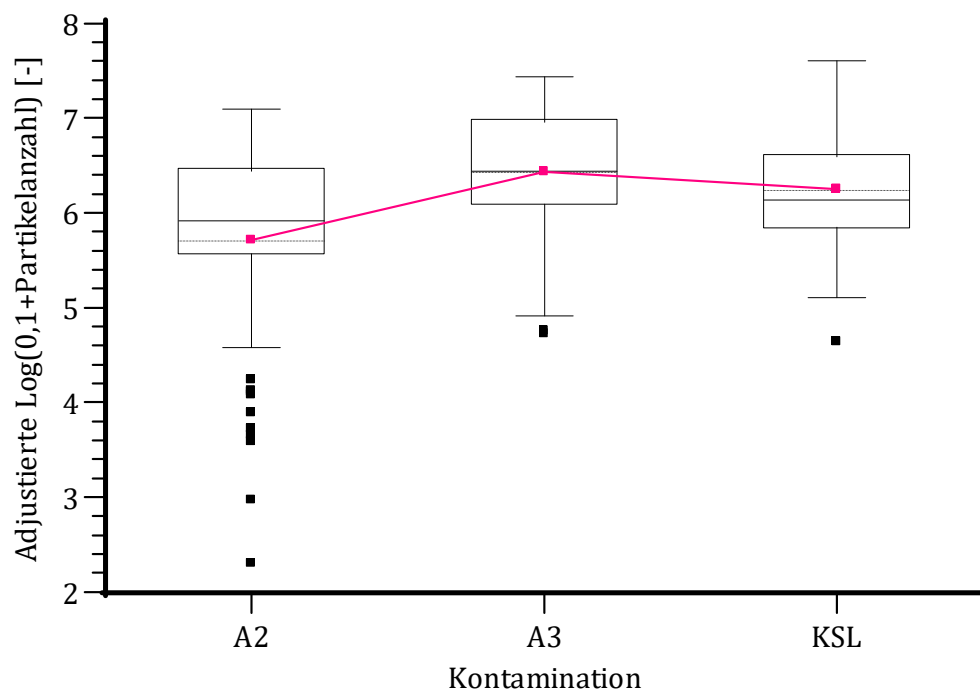


Abbildung 49: Adjustierter Antwortgraph des Größenkanals $15 \mu\text{m} < d \leq 25 \mu\text{m}$ von Edelstählen bei der Kontamination A2, A3 und KSL detektiert mit dem Streiflichtmessgerät ($n=182$)

Tabelle 18: Signifikanzniveau α für die Beschreibung des Einflusses der Reinigbarkeit in Abhängigkeit der Kontaminationsart

Größenkanal	$0,3 \mu\text{m} < d \leq 0,5 \mu\text{m}$	$0,5 \mu\text{m} < d \leq 1,0 \mu\text{m}$	$1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$
	α	α	α
Konstante	0	0	0
Kontamination	0,05	0,34	0,02
Probe	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$
R_{adj}^2	0,89	0,92	0,92

Tabelle 19: Signifikanzniveau α für die Beschreibung des Einflusses der Reinigbarkeit in Abhängigkeit der Kontaminationsart

Größenkanal [μm]	$5 < d \leq 15$	$15 < d \leq 25$	$25 < d \leq 50$	$50 < d \leq 100$
	α	α	α	α
Intensität I	0,01	$4 \cdot 10^{-3}$	0,60	0,13
Schwellwert S	0	0	0	0
Kontamination	$7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Probe	$4 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
R_{adj}^2	0,99	0,98	0,97	0,91

Die signifikanten Unterschiede der Reinigungsergebnisse bei den Kontaminationen können aus den unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen und -morphologie sowie den sich daraus ergebenden variierenden Fließfähigkeiten resultieren. Qualitativ zeigt sich unabhängig von der partikulären Kontamination das gleiche Systemverhalten auf den Feststoffoberflächen.

Ausgangskonzentration der partikulären Kontamination

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Menge der initial aufgetragenen Kontamination A1 variiert. Hierbei entspricht die aufgetragene Partikelmenge 100% (=0,01 g je Prüffläche, vgl. Kapitel 5.3). An den Proben P4, P7 und P9 wurden zudem Reinigungsversuche durchgeführt, bei denen die Ausgangskonzentration der Kontamination auf 66% und 33% reduziert wurde.

Bei der Reduktion der initial aufgetragenen Menge an Kontamination ist eine geringere Restkontamination nach dem Reinigungsvorgang zu erwarten.

Mit dem adjustierten Antwortgraphen (Abbildung 50) wird zunächst gezeigt, dass die Probe und somit ihre Oberflächeneigenschaften unabhängig von der aufgetragenen Partikelkonzentration einen Einfluss auf die Restpartikelmenge P nach der Reinigung hat. In Abbildung 51 wird dargestellt, dass ein stetiger Zusammenhang zwischen der Menge der initial aufgetragenen Kontamination und der Restverschmutzung nach dem Reinigungsvorgang besteht. Die Bandbreite (grau schraffierte Fläche) der Partikelanzahlen resultiert aus dem Einfluss der variierenden Oberflächeneigenschaften der untersuchten Proben. In

Tabelle 20 sind die Signifikanzniveaus α zur Beschreibung des Einflusses der Konzentration der Ausgangskontamination auf die Restpartikelmenge nach der Reinigung angegeben.

Tabelle 20: Signifikanzniveau α für die Beschreibung des Einflusses der Reinigbarkeit in Abhängigkeit der initial aufgegebenen Konzentration der Kontamination

Größenkanal	$5 \mu\text{m} < d \leq 15 \mu\text{m}$	$15 \mu\text{m} < d \leq 25 \mu\text{m}$	$25 \mu\text{m} < d \leq 50 \mu\text{m}$
	α	α	α
Konz. [%]	0	0	0
Probe	$2 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$
R_{adj}^2	0,98	0,92	0,92

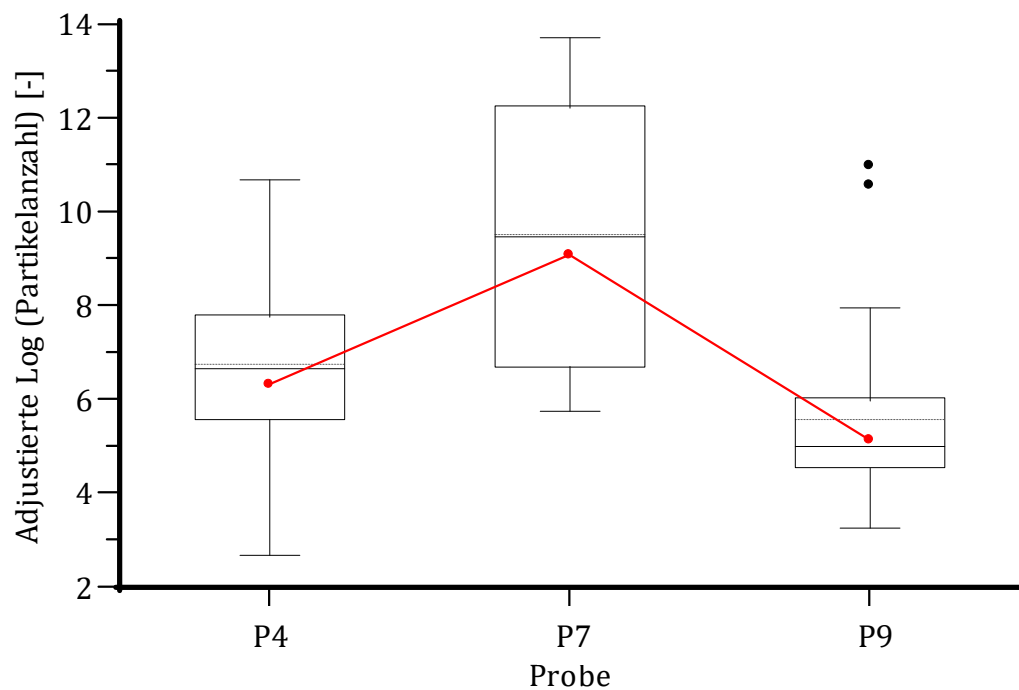


Abbildung 50: Adjustierter Antwortgraph des Größenkanals $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler für den Faktor Probe der Ausgangskontamination ($n=80$, $R_{adj}^2=0,92$)

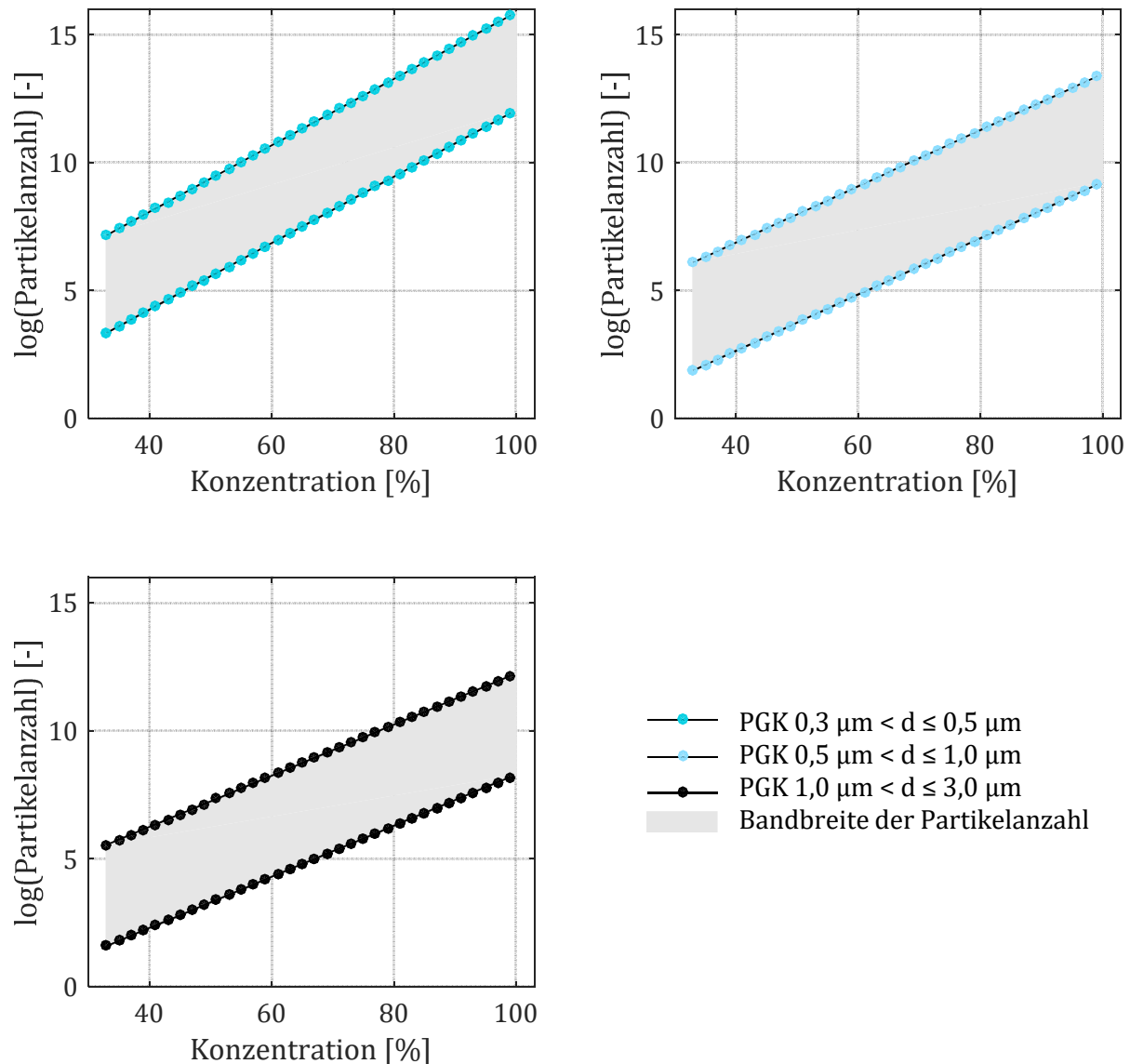


Abbildung 51: Adjustierter Antwortgraph der Größenkanäle $0,3 \mu\text{m} < d \leq 0,5 \mu\text{m}$, $0,5 \mu\text{m} < d \leq 1,0 \mu\text{m}$ und $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler für den Faktor Konzentration der Ausgangskontamination (je Partikelgrößenkanal $n=80$, $R_{adj}^2=0,98$, $R_{adj}^2=0,92$, $R_{adj}^2=0,92$)

7.2.3 Einfluss der Prozessparameter

Reinigungsgeschwindigkeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der Reinigungsgeschwindigkeit als mechanischer Prozessparameter an den Edelstahlproben untersucht. Hierbei entspricht die im regulären Versuch verwendete Reinigungsgeschwindigkeit $v = 100\%$. Diese wird in weiteren Versuchen auf 66% und 33% der Reinigungsgeschwindigkeit reduziert.

Die Abbildung 52 zeigt die Regression des Einflusses der Reinigungsgeschwindigkeit auf die Partikelanzahl P nach der Reinigung. Die obere und untere Grenze der „Bandbreite“

der Restpartikelmenge wird durch die Proben mit den variablen Oberflächeneigenschaften determiniert.

Die Signifikanzniveaus α und die Bestimmtheitsmaße für die Anpassung dieser Faktoren an ein Verhaltensmodell sind in Tabelle 21 gegeben.

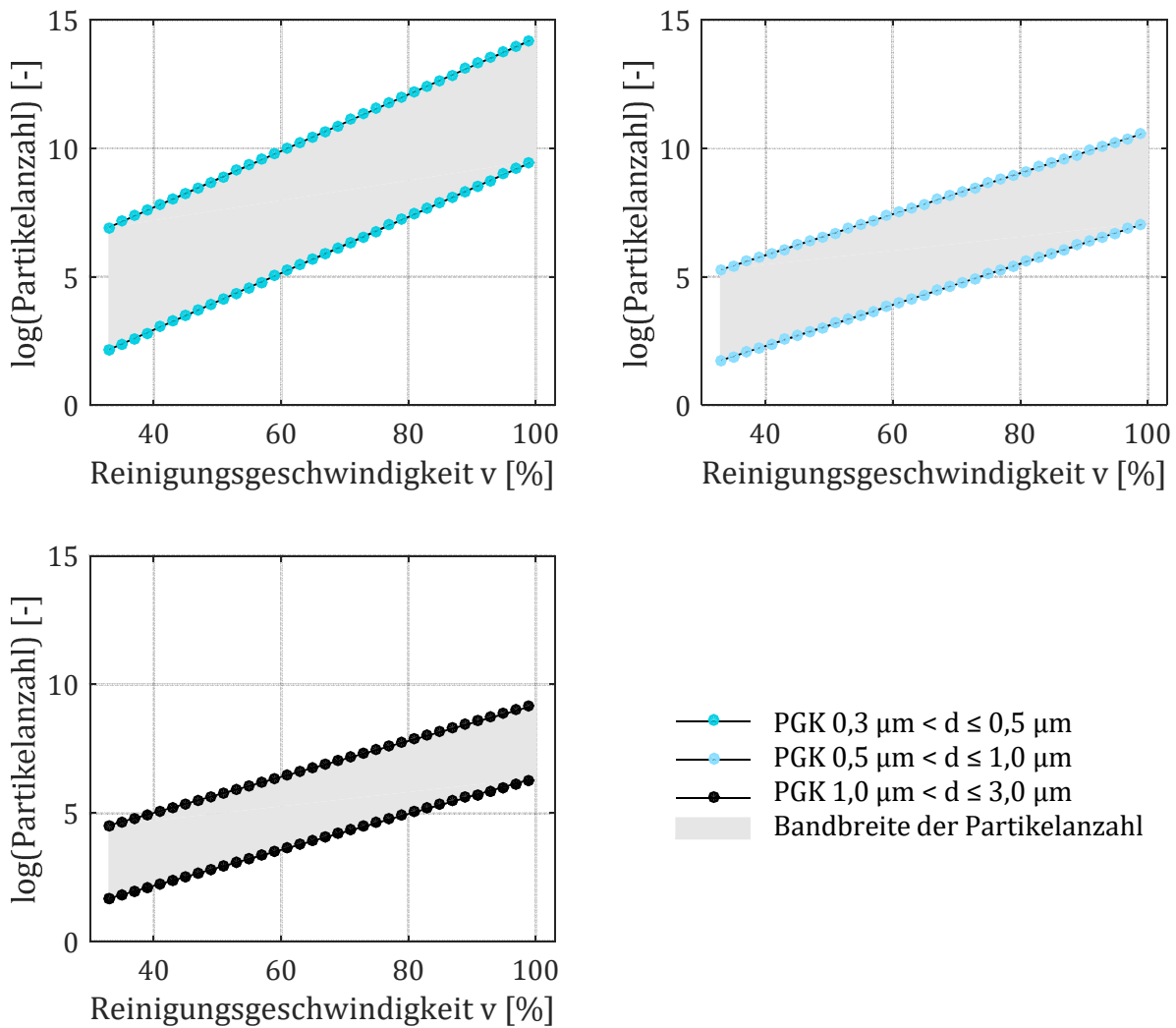


Abbildung 52: Adjustierter Antwortgraph der Größenkanäle $0,3 \mu\text{m} < d \leq 0,5 \mu\text{m}$, $0,5 \mu\text{m} < d \leq 1,0 \mu\text{m}$ und $1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler für den Faktor Reinigungsgeschwindigkeit v bei Edelstahlproben (je Partikelgrößenkanal $n=234$, $R_{adj}^2=0,85$, $R_{adj}^2=0,83$, $R_{adj}^2=0,77$)

Mit zunehmender Reinigungsgeschwindigkeit ist eine höhere Restpartikelmenge festzustellen. Insbesondere im Partikelgrößenkanal $0,3 \mu\text{m} < d \leq 0,5 \mu\text{m}$ wird der Einfluss der Reinigungsgeschwindigkeit deutlich. Bei den größeren Partikelgrößenkanälen reduziert sich dieser Einfluss tendenziell. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass bei höhe-

ren Geschwindigkeiten ein größerer Impuls bzw. mehr Scherenergie in das gesamte Partikelkollektiv eingetragen wird und Agglomerate zunehmend in Primärpartikel aufgelöst oder zerkleinert werden. Somit werden mehr Partikel geringerer Größe messbar.

Tabelle 21: *Signifikanzniveau α für die Beschreibung des Einflusses der Reinigbarkeit in Abhängigkeit der Reinigungsgeschwindigkeit v*

Größenkanal	$0,3 \mu\text{m} < d \leq 0,5 \mu\text{m}$	$0,5 \mu\text{m} < d \leq 1,0 \mu\text{m}$	$1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$
	α	α	α
$v [\%]$	0	0	0
$Probe$	$2 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-5}$	0,04
R_{adj}^2	0,85	0,83	0,77

Feuchtegehalt beim Reinigungsvorgang

Der Einfluss der Feuchte bei der Reinigung soll im Folgenden analysiert werden. Hierfür wird bei sechs Edelstahlproben (E1b, 2, 3b, 4b, 5b, 6b) die Ausgangskontamination in Wasser dispergiert und ohne vollständige Trocknung abgereinigt. Unter diesen Randbedingungen sind bereits vor dem Reinigungsvorgang große Kapillarbrücken und Zustände lokaler Sättigung zwischen den Partikeln sowie zwischen den Partikeln und der Feststoffoberfläche vorhanden.

In den vorherigen Abschnitten wurde festgestellt, dass im nicht-immernierten System innerhalb einer Materialgruppe ausschließlich die Rauheit einen signifikanten Effekt auf dessen Reinigbarkeit hat. Die Übertragbarkeit dieser Aussage kann für den vorliegenden Fall nicht bestätigt werden: Die freie Oberflächenenergie beeinflusst die Reinigbarkeit von Edelstahlproben in feuchter Umgebung signifikant, wohingegen die Rauheit keinen Einfluss ausübt. Mit steigender Oberflächenenergie nimmt der Partikelrückstand nach der Reinigung exponentiell zu (vgl. Tabelle 22 und Abbildung 53):

$$\hat{P} = e^{\gamma_s \cdot b_i} - k_0 \quad (43)$$

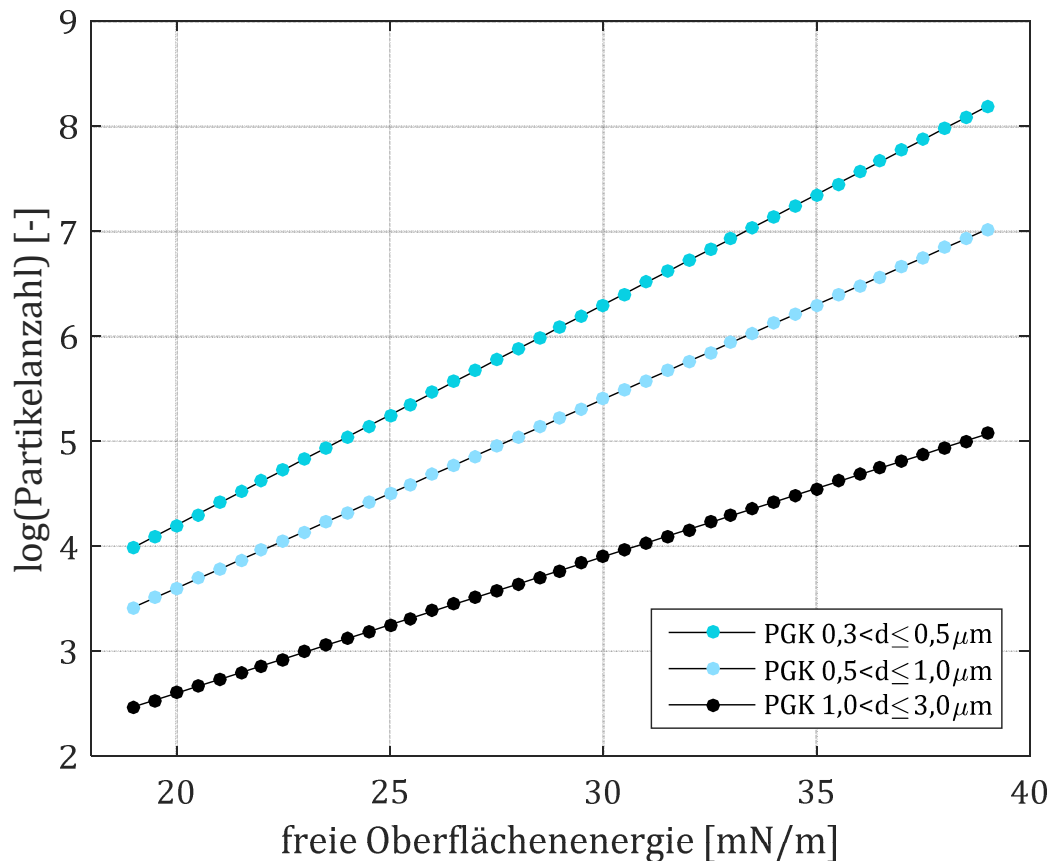


Abbildung 53: Abhängigkeit der Partikelanzahl von dem Faktor freie Oberflächenenergie bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler bei Edelstahlproben (je Partikelgrößenkanal $n=54$, $R_{adj}^2=0,99$, $R_{adj}^2=0,94$, $R_{adj}^2=0,78$)

Tabelle 22: Koeffizienten b und Signifikanzniveau α für die Beschreibung des Einflusses der Reinigbarkeit bei hoher Feuchte

Größenkanal	0,3 µm < d ≤ 0,5 µm		0,5 µm < d ≤ 1,0 µm		1,0 µm < d ≤ 3,0 µm	
	b	α	b	α	b	α
γ_S [mN/m]	0,21	0	0,18	0	0,13	0
R_{adj}^2	0,99		0,94		0,78	

Diese Ergebnisse stimmen mit den Erkenntnissen von SAIKHWAN ET AL. [161] überein, die im immmergierten System einen Zusammenhang zwischen freier Oberflächenenergie und Verschmutzung feststellen konnten. Mit der Theorie der Adhäsionskräfte nach DMT (kleine und steife Kontaktpartner, Gleichung (24)) oder den van-der-Waals-Kräften (vgl. Kapitel 3.1.1) können die hier erzielten Resultate ansatzweise erklärt werden, da mit der Zunahme der freien Oberflächenenergie auch die Restpartikelmenge zunimmt. Bei dieser Korrelation wäre ein vertikales Abheben der dominierende Versagensmechanismus. Gemäß der Theorie müsste ein linearer Zusammenhang vorliegen, der in den Experimenten jedoch nicht festgestellt wurde. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass keine idealen Randbedingungen eines immmergierten oder eines nicht-immmergierten Systems vorliegen

und die Wechselwirkungen nicht ausschließlich zwischen einem einzelnen Partikel und der Feststoffoberfläche auftreten, sondern ein Partikelkollektiv mit interpartikulären Wechselwirkungen gegeben ist.

Weiterhin ist festzustellen, dass sich der Einfluss der freien Oberflächenenergie auf die Restpartikelmenge mit zunehmender Partikelgröße reduziert. Diese Erkenntnis entspricht wiederum den Erfahrungen der eigenen Reinigungsversuche im nicht-immergierten System, in denen sich der Einfluss der Oberflächeneigenschaften mit zunehmender Partikelgröße reduziert (Kap. 7.2.1). Dies ist für die freie Oberflächenenergie darauf zurück zu führen, dass bei zunehmender Partikelgröße der Anteil der Gewichtskraft gegenüber den restlichen (oberflächenphysikalischen) Adhäsionskraftanteilen zunimmt und somit verstärkt mechanische Einflüsse relevant sind. Im Mittel wird ein geringerer Partikelrückstand bei hoher Feuchte gemessen.

Anzahl der Wischhübe

Die Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter auf den Reinigungserfolg soll beschrieben werden. Neben der Reinigungsgeschwindigkeit und der Partikelfeuchte ist die Abhängigkeit des Reinigungserfolges bei einer variablen Anzahl an Wischhüben zu untersuchen, da nicht bei jedem Wischvorgang ein momentanes Entfernen aller Partikel möglich ist. Die Reinigungskinetik als zeitlicher Fortschritt beim Reinigungsprozess ist für nicht-immernierte Systeme bei partikulärer Kontamination bisher nicht untersucht worden. An der Probe P9 wird daher die Restpartikelmenge nach $w = 1, 2, 3, 4$ und 5 Wischhüben ermittelt.

Im zeitlichen Ablauf einer Scheuer-Wisch-Reinigung reduziert sich die Restpartikelanzahl P auf der Oberfläche mit jedem Wischvorgang in allen Partikelgrößenkanälen. Eine deutliche Reduktion der Restpartikelmenge ist von Wischhub 1 auf Wischhub 2 zu beobachten. Bei einer weiteren Erhöhung der Wischhubanzahl ist ein verbesserter Reinigungserfolg weniger deutlich erkennbar (vgl. Abbildung 54).

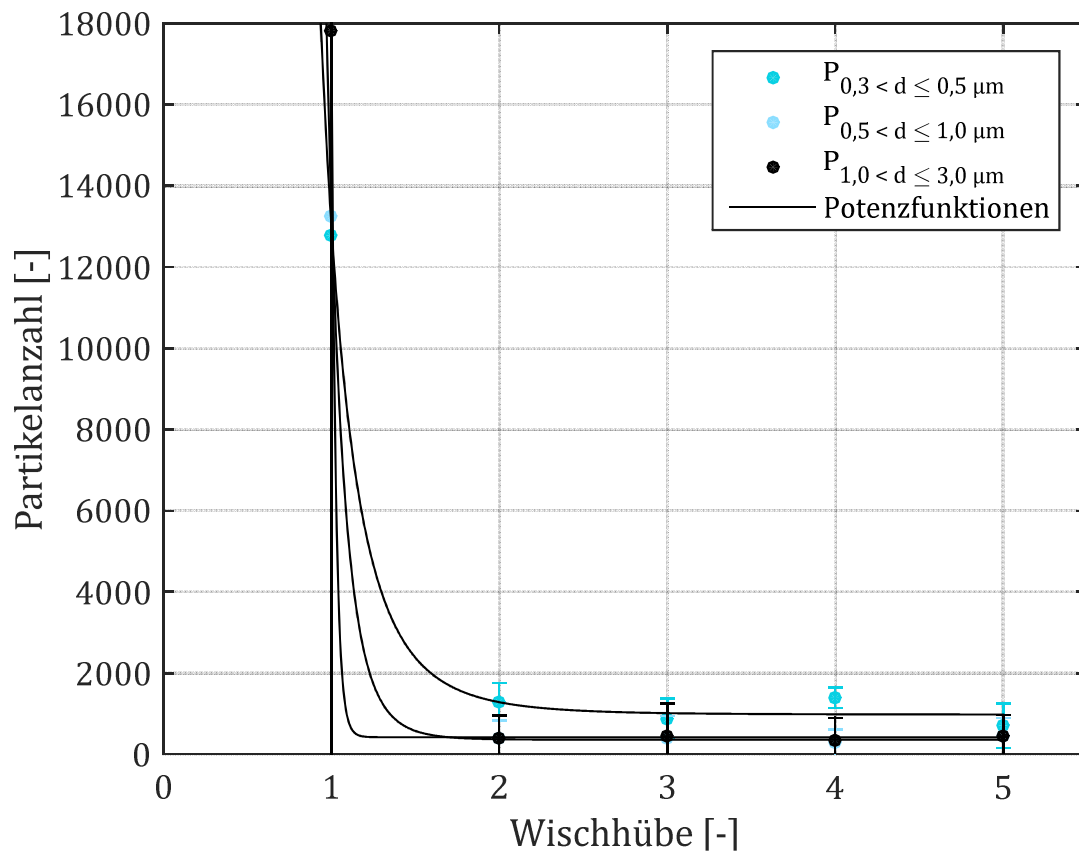


Abbildung 54: Restpartikelanzahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Wischhübe (je Partikelgrößenkanal $n=45$)

In immmergierten Systemen werden Reinigungskinetiken oftmals an Weibull-Verteilungen angepasst [45, 168]. Die beste verhaltensbeschreibende Modellierung der Reinigungskinetik bei einer Scheuer-Wisch-Reinigung bietet jedoch die elementare mathematische Potenzfunktion:

$$P = aw^b + c \quad (44)$$

Hierbei ist P [-] die gemessene Restpartikelanzahl auf der Probe, a [-], b [-] und c [-] dimensionslose Parameter zur Beschreibung der Form und Position des Graphen (Krümmung, Streckung und Verschiebung entlang der y-Achse) und w [-] die Anzahl der Wischhübe. Die Parameter, die die hier durchgeführten Versuche aller Partikelgrößenkanäle beschreiben, sind in der Tabelle 23 aufgeführt. Die beschreibenden Funktionen weisen einen asymptotischen Verlauf auf; es werden folglich niemals alle Partikel entfernt.

Die Partikelmenge wird im ersten Wischhub gegenüber der initialen Kontamination deutlich reduziert, sodass für den darauffolgenden Wischvorgang die Partikelschichtdicke geringer ist. Veränderte Randbedingungen für die darauffolgenden Wischvorgänge sind die Folge. Darüber hinaus konnte bei der Untersuchung der Adhäsionskräfte mit Einzelpartikeln in Kapitel 6.2 bereits gezeigt werden, dass bei Reinigungsvorgängen mit Tensiden

eine Veränderung der freien Oberflächenenergie erfolgt. Dieser Effekt ist bei Reinigungsvorgängen ab dem zweiten Wischhub zu berücksichtigen, da die Grenzfläche zwischen Partikel und Feststoffoberfläche verändert wird. Außerdem entstehen durch kapillares Saugen und Sickerprozesse aus dem Reinigungstuch in das verbleibende Partikelkollektiv vermehrt stärker ausgebildete Kapillarbrücken zwischen den Partikeln und der Oberfläche, die wiederum die adhäsiven Kräfte zwischen der Feststoffoberfläche und dem Partikel erhöhen und die Reinigung somit erschweren. Diese könnten ursächlich dafür verantwortlich sein, dass keine vollständig reine Oberfläche erreicht wird.

Tabelle 23: Koeffizienten a , b und c für die Beschreibung des Einflusses der Wischhöhe auf die Partikelanzahl nach der Reinigung mittels einer Potenzfunktion

Größenkanal	$0,3 \mu\text{m} < d \leq 0,5 \mu\text{m}$	$0,5 \mu\text{m} < d \leq 1,0 \mu\text{m}$	$1,0 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$
a	$1,2 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$
b	-5,3	-10,1	-39,2
c	975,3	356,1	417,3
R_{adj}^2	0,99	1,0	1,0

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass ein Einfluss der Kontamination des Wischtuches vorliegen kann. An den Edelstahlproben wird die Restpartikelmenge ohne und mit einem Lappenwechsel zwischen dem ersten und dem zweiten Wischhub gemessen. Mit einem Lappenwechsel zwischen zwei Wischhöben werden je nach Partikelgrößenkanal ca. 40 bis 50% geringere Restpartikelmengen bestimmt als ohne Lappenwechsel (vgl. Abbildung 55). Folglich besteht grundsätzlich die Möglichkeit eines zusätzlichen Kontaminationseintrags durch unreines Reinigungsmaterial.

Es ist wahrscheinlich, dass der Kontaminationseintrag auch vom Reinigungstuch abhängt. In [105] werden verschiedene Reinigungstücher im Mikroskop betrachtet. Deutliche Unterschiede im strukturellen Aufbau lassen ein abweichendes Reinigungsverhalten vermuten.

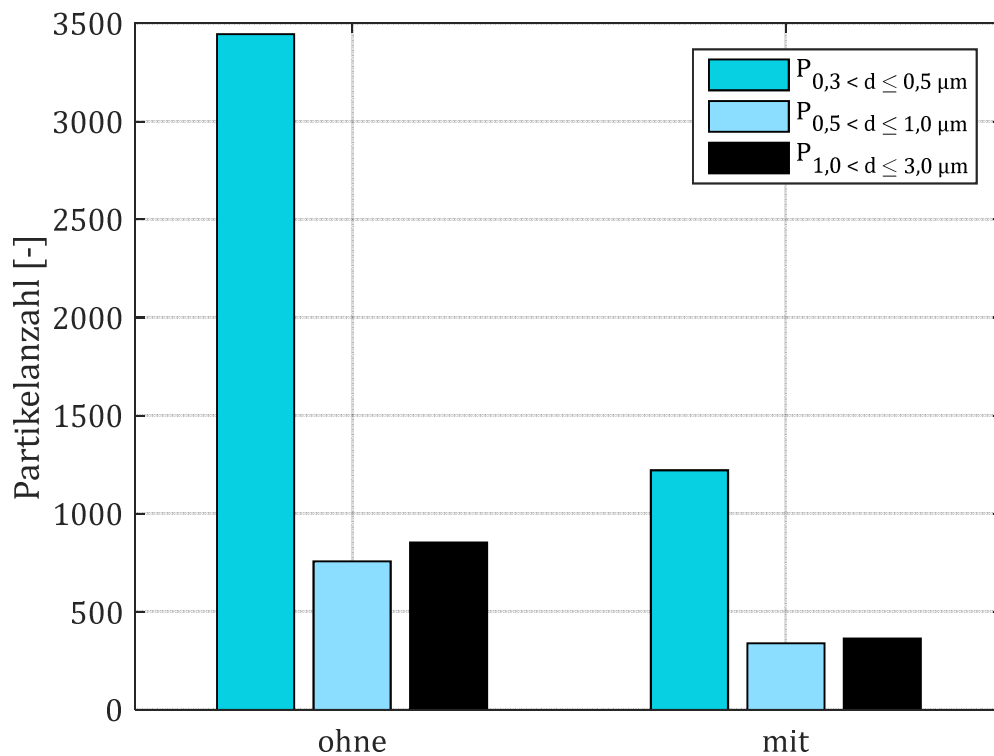


Abbildung 55: Restpartikelanzahl nach zwei Wischhüben ohne und mit Lappenwechsel an Edelstählen ($n_{ges}=594$)

7.2.4 Modellvalidierung

Aufgrund mangelnder vergleichbarer Versuchsergebnisse in der Literatur wird das Modell anhand von eigenen Ergänzungsversuchen validiert. Um ein ausreichendes Vertrauensniveau zu erreichen, werden alle ausgewerteten Partikelgrößenkanäle und zwei Rückstellproben, die nicht in die Modellerstellung eingegangen sind, untersucht. Die Proben wurden so ausgewählt, dass diese frei im vom Modell abgebildeten Versuchsraum liegen. Die Kennwerte der Proben für die Ergänzungsversuche sind in Tabelle 24 dargestellt. Jeder Versuch wird neun Mal wiederholt, um die Streuungen in den Versuchen abzubilden.

Tabelle 24: Kennwerte der Proben für die Validierungsversuche und durchschnittlich gemessene Partikelanzahl P ($n=9$)

Probe	Name	R_a [μm]	γ_s [mN/m]	$P_{0,3\mu m < d \leq 0,5\mu m}$	$P_{0,5\mu m < d \leq 1\mu m}$	$P_{1\mu m < d \leq 3\mu m}$
E5a	V1	0,21	33,45	3176,0	171,6	82,7
P2	V2	1,39	23,28	1707,2	184,3	113,6

Das Modell wird als valide angenommen, wenn die Messwerte der Ergänzungsversuche innerhalb der berechneten 95%-Konfidenzintervalle des Prognosemodells liegen. Diese sind in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Prognostizierte Partikelanzahl \hat{P} sowie berechnete Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls der Validierungsversuche V1 und V2

Größenkanal $[\mu\text{m}]$	V1			V2		
	$0,3 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 3$	$0,3 < d \leq 0,5$	$0,5 < d \leq 1$	$1 < d \leq 3$
$\hat{P}_{95\%,u}$	1428,4	72,4	28,6	1753,6	100,2	34,7
\hat{P}	2544,4	129,7	53,7	3449,2	100,2	72,6
$\hat{P}_{95\%,o}$	4532,4	232,5	100,8	6784,5	393,5	151,9

In der Abbildung 56 ist das Ergebnis der Validierungsversuche gezeigt. Die Messwerte der untersuchten Partikelgrößenkanäle an den beiden Proben zeigen eine sehr hohe Übereinstimmung mit den mit dem Modell prognostizierten Werten. Lediglich der Versuch V2 liegt im Partikelgrößenkanal $0,3 \mu\text{m} < d \leq 0,5 \mu\text{m}$ außerhalb des 95%-Konfidenzintervalls.

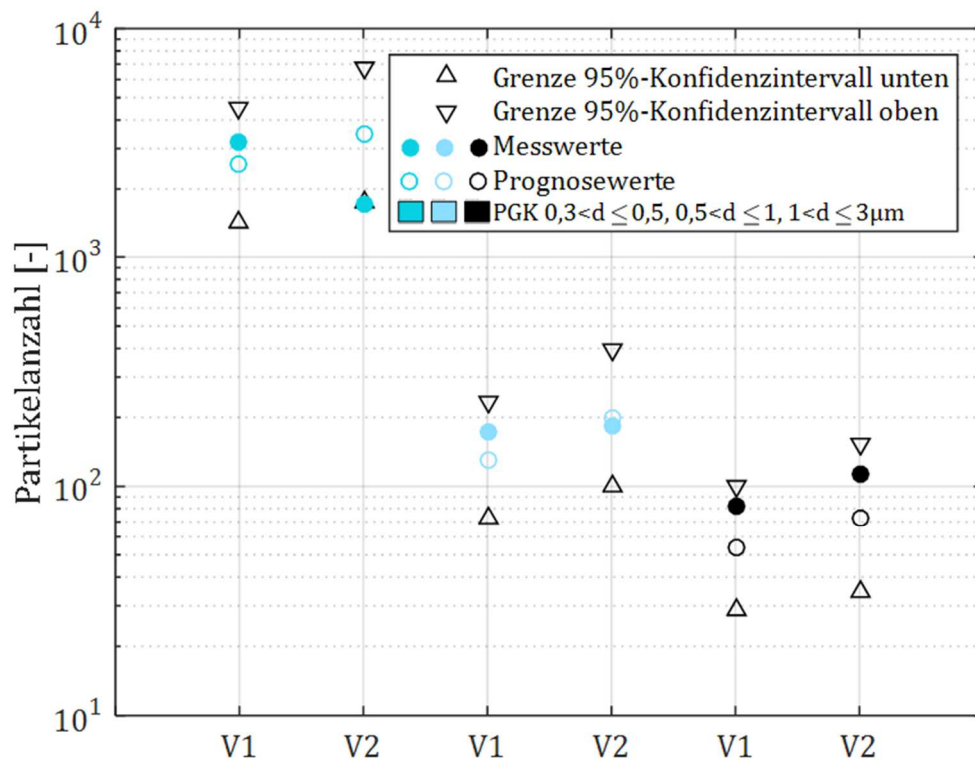


Abbildung 56: Validierung der Messwerte mit den berechneten Modellwerten bei der Kontamination A1 detektiert mit dem Partikelzähler (je Versuch $n=9$)

7.3 Modellvorstellung

Allgemein

Es ist eine sehr hohe Belegungsdichte von SiO_2 -Partikeln auf der Feststoffoberfläche vor der Reinigung gegeben (vgl. Abbildung 19). Bei den Partikeln handelt es sich um gebrochene Körner, die aufgrund der Abweichung von einer idealen Form eine richtungsabhängige Struktur aufweisen. Dementsprechend können leicht veränderte Kraftübertragungsmechanismen vorliegen. Vereinfacht wird in der Modellvorstellung von einem glatten, runden, mehrlagigen Partikelkollektiv auf einer technischen Oberfläche ausgegangen.

Beim Reinigungsvorgang kann das Partikelkollektiv bei den betrachteten Versuchen in drei Zuständen vorliegen (vgl. Abbildung 57). Im Zustand A liegen die Partikel bei Umgebungsbedingungen (relative Luftfeuchte $> 0\%$) vor. Die Oberflächen der Partikel adsorbieren eine monomolekulare Wasserschicht. An den Kontaktpunkten bilden sich aufgrund von Kapillarkondensation Flüssigkeitsbrücken aus. In Zustand B ist der Feuchtegehalt gegenüber den Umgebungsbedingungen stark erhöht; neben den voll ausgebildeten Kapillarbrücken zwischen den Partikeln gibt es Bereiche lokaler Feuchtesättigung. Dies bedeutet eine Vergrößerung der Kapillar- und folglich der gesamten Adhäsionskräfte, welche im Partikelkollektiv zu erhöhter Kohäsion und dementsprechend reduzierter Fließfähigkeit führen. In Zustand C liegt das Partikelkollektiv vollständig gesättigt vor und weist das Verhalten einer Suspension auf, die wiederum mit einer hohen Fließfähigkeit einhergeht.

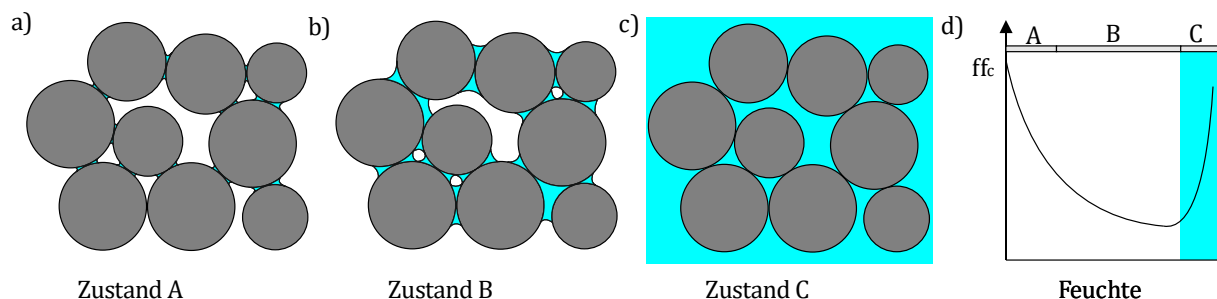


Abbildung 57: *Partikelkollektiv mit unterschiedlichen Benetzungsgraden nach SCHULZE [171]: a) einzelne Flüssigkeitsbrücken; b) vollständig ausgebildete Flüssigkeitsbrücken bis lokale Sättigung; c) gesättigter Zustand (Suspension) d) Fließfähigkeit eines Partikelkollektivs bei unterschiedlichem Feuchtegehalt*

Es ist davon auszugehen, dass der Zustand A vor der Reinigung vorliegt. Sowohl der Zustand A als auch der Zustand B werden während des Reinigungsvorganges erreicht, da im Kontaktbereich vom Reinigungstuch Flüssigkeit in das Partikelkollektiv übergeht. Zustand C liegt im regulären Reinigungsversuch nicht vor.

Oberflächeneigenschaften

Während des Reinigungsvorganges bildet sich zwischen Reinigungsschlitten und Partikelkollektiv eine Scherrate $\dot{\gamma}$ (mit $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dh}$) orthogonal zur Belastungsrichtung aus. Da es sich um einen kleinen Spalt der Höhe h zwischen Reinigungsschlitten und Oberfläche handelt, ist vereinfachend davon auszugehen, dass eine annähernd lineare Geschwindigkeitsverteilung im Haupt-Partikelkollektiv vorliegt. Die Höhe h kann weiter in die Bereiche δ , h_A und h_B unterteilt werden, wobei in δ und h_A Zustand A vorherrscht (einzelne Kapillarbrücken) und in Bereich h_B Zustand B (vollständig ausgebildete Kapillarbrücke bis lokale Sättigung, vgl. Abbildung 57).

Es gilt die Haftbedingung an der Feststoffoberfläche (keine Relativgeschwindigkeit zwischen Oberfläche und unmittelbar angrenzendem Bereich, $v=0$ m/s), die zu einer Randzone in Oberflächennähe führen könnte. Innerhalb der Randzone gleicht sich die Geschwindigkeit der Partikel der Geschwindigkeit des Haupt-Partikelkollektivs an. Die Randzone reicht von der Feststoffoberfläche bis zur Oberseite des Partikels, welches mit der Oberfläche in Kontakt ist und am weitesten in das restliche Partikelkollektiv hineinragt. Aufgrund verschiedener Partikelgrößen ist es möglich, dass nicht alle Partikel in der Randzone mit der Oberfläche in Kontakt sind. Die geometrische Ausdehnung der Randzone δ wird folglich durch die Oberflächeneigenschaften des jeweiligen Materials und die Partikelgrößenverteilung der Kontamination bestimmt. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 58 schematisch dargestellt.

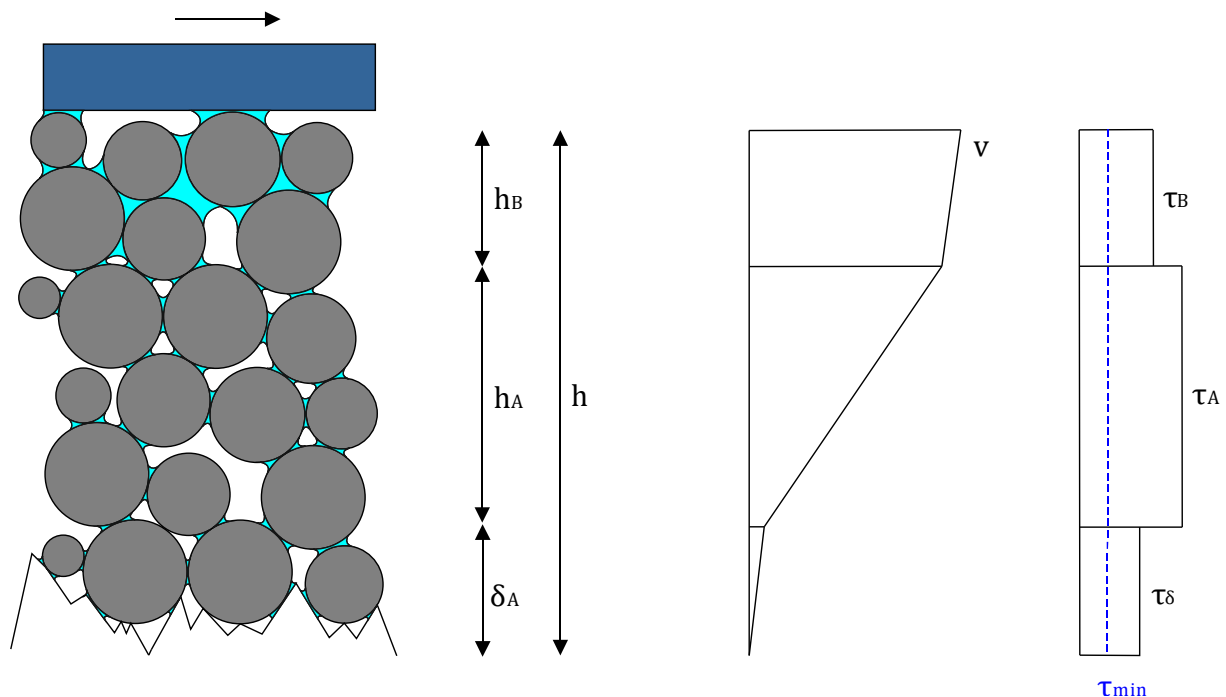


Abbildung 58: Scherrate und Geschwindigkeitsprofil im Partikelkollektiv, wenn die Schubspannung die Mindestschubspannung für den Fließzustand des Partikelkollektivs übersteigt.

Innerhalb der Randzone können Impulse von Partikel zu Partikel – die wiederum die Fließgeschwindigkeit beeinflussen – lediglich begrenzt übertragen werden. Dies ist neben

der Haftbedingung auf den mechanischen Schutz in den Rautiefen zurückzuführen. Außerhalb der Randzone werden Impulse ungestört interpartikulär übertragen.

Eine Mindestschubspannung ist im Partikelkollektiv erforderlich, um nicht nur eine elastische Verformung, sondern einen Fließzustand zu erzeugen und somit eine Entfernung der Partikel zu ermöglichen. Aus der Schüttguttechnik ist bekannt, dass sich bei zunehmender Scherverformung eines Schüttguts die Scherzone auf einen kleinen Bereich in der Probe begrenzt [56]. Dieses sogenannte Scherband bildet sich bei homogenen Proben tendenziell im Bereich geringerer Normalspannungen aus, da dort geringere Schubspannungen zur Erreichung des Fließzustandes erforderlich sind. Bei sehr großer Scherverformung bilden sich zunächst geneigte Scherbänder (Riedel-Shears) und anschließend horizontale Scherbänder (Y-Shears) [120] aus. Der prinzipielle Schubspannungsverlauf und die Bruchorte in einem Partikelkollektiv bei großen Scherverformungen - wie sie bei einem Reinigungsvorgang zu erwarten sind - sind schematisch in Abbildung 59 dargestellt.

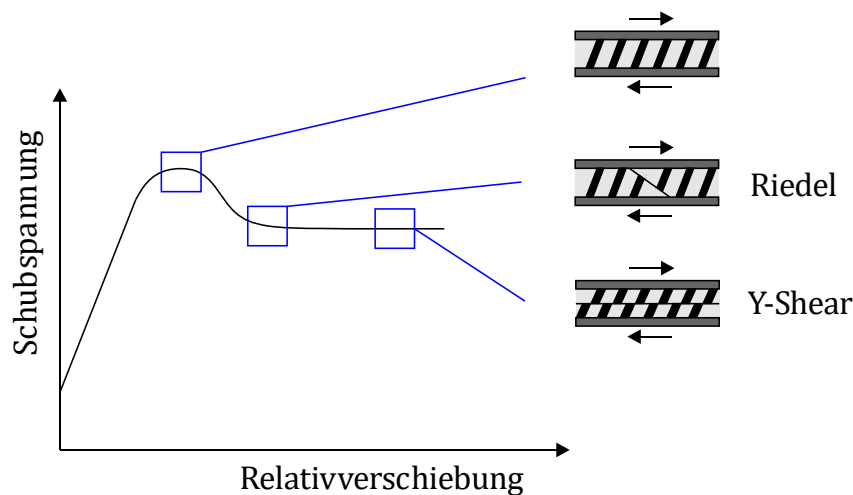


Abbildung 59: Prinzipieller Schubspannungsverlauf in Abhängigkeit von der Relativverschiebung zwischen Feststoffoberfläche und Reinigungsutensil eines kohäsiven Partikelkollektivs. Die Scherverformungen schwarze vertikaler Schichten vor dem Bruch und die Bruchorte bei Riedel- und Y-Scherbändern sind dargestellt. Nach [120]

Die Ausbildung eines Bruchortes ist trotz geringerer Normalspannung in h_B aufgrund der höheren Fließfähigkeit im trockenen Partikelkollektiv (Zustand A) wahrscheinlicher. Beim Reinigungsvorgang bilden sich Scherbänder überwiegend im Bereich h_A aus, da dort höhere Schubspannungen als in der Randzone δ wirken. Je näher sich die Scherbänder an der zu reinigenden Feststoffoberfläche bilden, umso geringer ist die Restpartikelmenge nach der Reinigung. Nach der Reinigung liegt kein geschlossener Kontaminationsfilm, sondern primär vereinzelte Partikel aus der Randzone vor; dies kann mithilfe des REMs gezeigt werden (vgl. Abbildung 60).

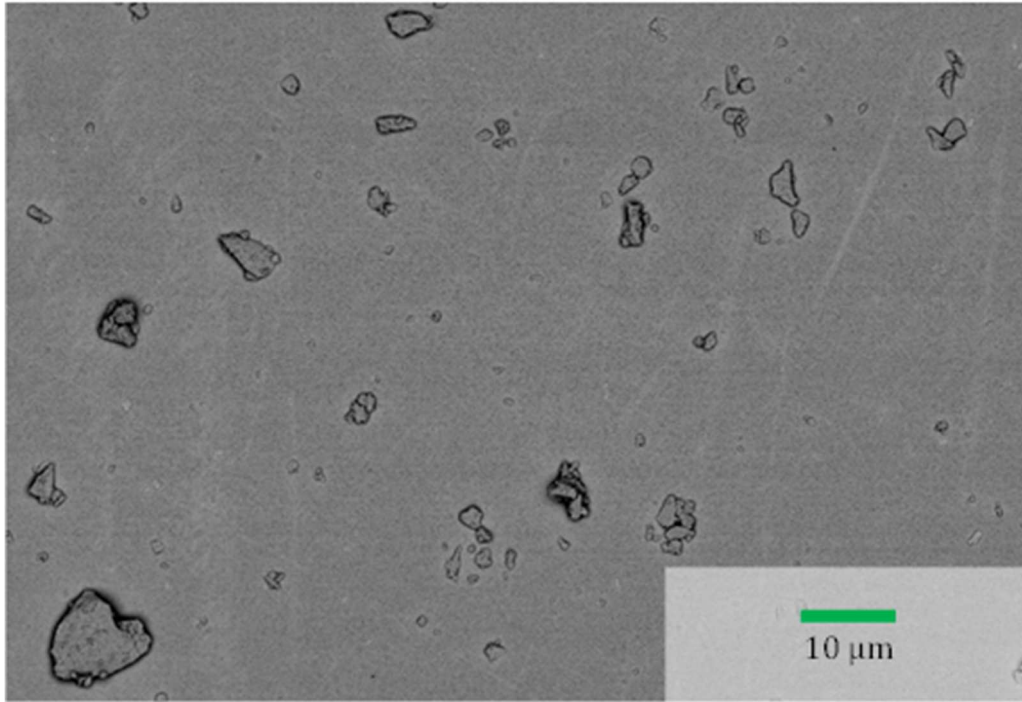


Abbildung 60: Restkontamination A1 der Probe E2 nach der Reinigung

Kontamination

Die verwendeten Kontaminationen wurden in der Ringscherzelle hinsichtlich ihrer Fließfähigkeit untersucht. Diese ist spezifisch für jede Kontamination und hängt von Partikelmaterial, -form, -verteilung sowie weiteren Faktoren ab. Die Schubspannung im Partikelkollektiv variiert daher von Kontamination zu Kontamination, auch wenn die gleiche Scherrate anliegt ($\tau \sim \eta \dot{\gamma}$). Folglich unterscheidet sich zudem die Restpartikelmenge nach dem Reinigungsvorgang, da bei höherer Schubspannung mehr Partikel entfernt werden. Grundsätzlich erfahren feinere Kontaminationen geometrisch bedingt eine höhere mechanische Schutzwirkung als gröbere. Dies wird durch die Dicke der Randzone δ begünstigt, welche kontaminationsseitig wesentlich durch die groben vorliegenden Partikel beeinflusst wird. Signifikante Unterschiede zwischen den Kontaminationen sind daher zu erwarten.

Es wurde festgestellt, dass bei niedrigerer initialer Partikelkonzentration prozentual weniger Partikel nach dem Reinigungsvorgang zurückbleiben. Dies ist neben der Tatsache, dass bereits im Ausgangszustand weniger Partikel aufgetragen werden, darauf zurück zu führen, dass mit einer reduzierten Partikelmenge die Dicke der Kontaminationsschicht h verringert wird. Wird der Reinigungsschlitten mit der gleichen Geschwindigkeit v über das Partikelkollektiv gefahren, stellt sich unter ansonsten einheitlichen Randbedingungen eine höhere Scherrate und somit auch eine höhere Schubspannung in der Kontamination ein. Die Mindestschubspannung für den Fließzustand wird folglich bei allen getesteten Partikelkonzentrationen erreicht. Da sich bei höheren Schubspannungen die Anzahl der Partikel, die im Reinigungsvorgang entfernt werden, erhöht, wird eine geringere Restkontamination nach der Reinigung gemessen.

Prozessparameter: Reinigungsgeschwindigkeit und -häufigkeit

Beim ersten Kontakt geht Reinigungsflüssigkeit durch einen abwärts gerichteten Prozess von dem Reinigungstuch in das Partikelkollektiv über. Es handelt sich hierbei um einen zeitabhängigen Prozess, der vermutlich aufgrund der geringen Flüssigkeitsmenge nicht mit dem Darcy-Gesetz [34] für laminar strömende Fluide in porösen Feststoffen, sondern über das kapillare Saugen erklärt werden könnte. Je länger die Kontaktzeit zwischen dem Partikelkollektiv und dem Reinigungstuch und je kleiner die spezifische Oberfläche der Partikel, umso größer ist die Menge der Flüssigkeit pro Zeiteinheit, die in das Partikelkollektiv gelangt und an den Partikeloberflächen adsorbiert. Die Flüssigkeitsmenge in den hier durchgeführten Versuchen reicht nicht aus, um die Zwischenräume zwischen den Partikeln vollständig zu sättigen (Zustand C), sodass sich Flüssigkeitsbrücken und ggf. lokale Sättigungen im Partikelkollektiv einstellen (Zustand B). Je mehr Flüssigkeit in das Partikelkollektiv übergeht, umso größer ist die Schichtdicke h_B in der sich Flüssigkeitsbrücken ausbilden (vgl. Abbildung 61). Diese führen zu höheren attraktiven Kräften (vgl. Kapitel 3.1.3 Kapillarkraft) zwischen den Partikeln sowie den Partikeln und dem Tuch. In der Literatur [171] ist bekannt, dass sich die Fließfähigkeit ff_c in Partikelkollektiven bei zunehmendem Feuchtegehalt reduziert und erst bei vollständiger Sättigung des Partikelkollektivs (=Suspension) eine erneute Erhöhung derselbigen eintritt (vgl. Abbildung 57d)). Bei langsamer Reinigungsgeschwindigkeit bildet sich aufgrund der längeren Kontaktzeit und somit der größeren übergehenden Flüssigkeitsmenge zwischen dem Tuch und dem Partikelkollektiv mehr Kapillarbrücken, die eine dickere Schicht geringerer Fließfähigkeit oberhalb des trockenen Partikelkollektivs ausbilden.

Es stellt sich ein Fließzustand ein, der mit hoher Wahrscheinlichkeit im Bereich h_A einen Bruchort aufweist und somit unterhalb der stärker kohäsiven Schicht liegt. Je dicker die kohäsive Schicht h_B , umso mehr Partikel werden beim Reinigungsvorgang entfernt, auch wenn die anliegende Scherrate geringer ist.

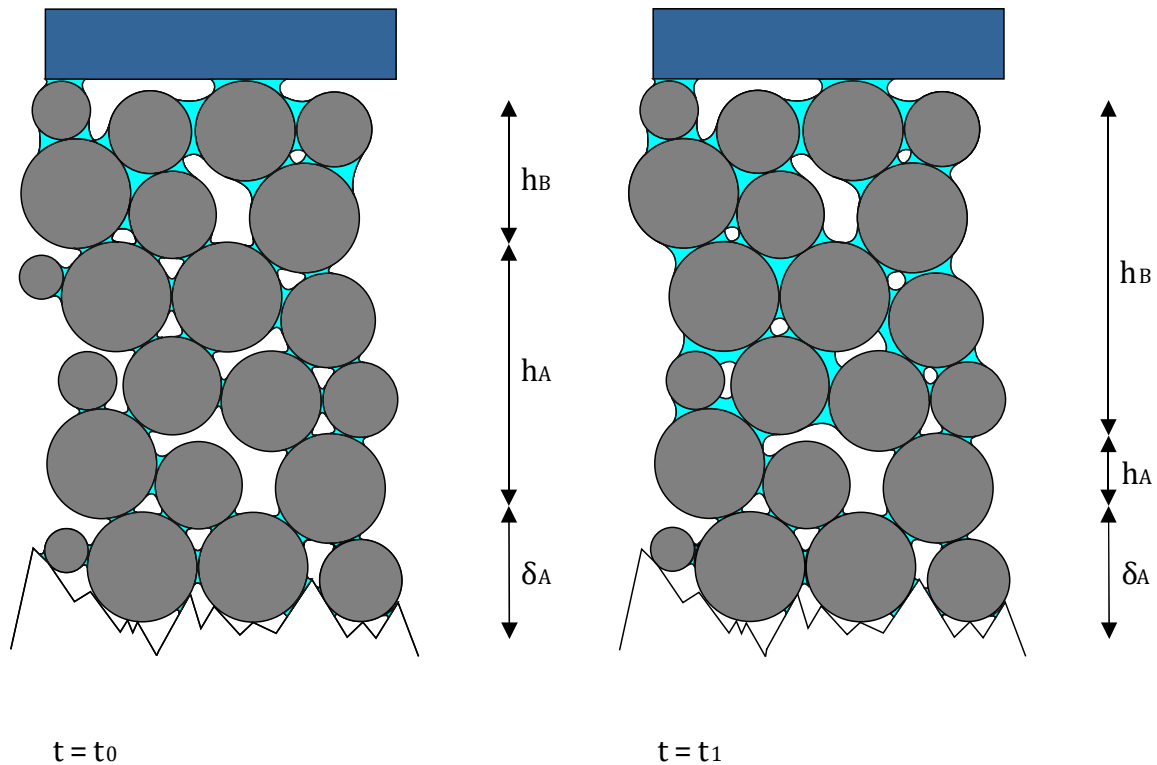


Abbildung 61: Partikelkollektiv bei Kontakt mit dem Reinigungsmedium im Zeitverlauf

Bei der Reinigung können mehrere Kontaktfälle auftreten. Idealisert betrachtet bestehen die Möglichkeiten: a) Partikel-Feststoffoberfläche, b) Partikel-Tuch, c) Partikel-Partikel und d) Mehrfachkombinationen der genannten Kontaktfälle. Das Zusammenspiel dieser Kontaktfälle bestimmt den Reinigungserfolg.

Bei mehreren Wischhüben reduziert sich die Schichtdicke h sukzessive und die anliegende Scherrate steigt entsprechend an. Die Mindestschubspannung im Partikelkollektiv wird – wie bei reduzierter Ausgangskontamination – erreicht. Nach dem ersten Wischhub kommt es aufgrund der Tensidbenetzung zu einer veränderten Grenzfläche zwischen den Feststoffen (Möglichkeit a) und c)), die initiale Zustandsverteilung (Zustand A und B) ändert sich für die darauffolgenden Wischhübe. Einige Partikel verbleiben jedoch auch nach mehrmaligen Wischhüben in der Randzone und gehen nicht in einen der für die Reinigung notwendigen Kontaktfälle b) bis d) über und können daher nicht entfernt werden.

Prozessparameter: Feuchte

Im trockenen Zustand der Partikel ist davon auszugehen, dass sich Zwickelwasser in geringen Mengen interpartikulär und zwischen Partikel und Feststoffoberfläche ausbildet. Bei den gegebenen Umgebungsbedingungen ($T=20^\circ\text{C}$, $<55\%$ r. F.) ist mindestens eine adsorbierte monomolekulare Wasserschicht auf den Feststoffen vorhanden (Zustand A). Im feuchten Zustand hingegen sind die Zwischenräume zwischen den Partikeln teilweise flüssigkeitsgefüllt oder es liegen voll ausgebildete Kapillarbrücken vor (Zustand B, $h_A = 0$, vgl. Abbildung 62). Die vorherrschenden adhäsiven Kräfte ändern sich quantitativ und die Kohäsion der Kontamination ist über die gesamte Höhe h erhöht. Im Reinigungsvorgang bildet sich im Hauptpartikelkollektiv ein lineares Geschwindigkeitsprofil aus. Lediglich in

unmittelbarer Nähe zur Feststoffoberfläche ist die Geschwindigkeit deutlich reduziert und direkt an der Oberfläche gleich null (Haftbedingung). In diesem Bereich der reduzierten Fließgeschwindigkeit (Randzone) befinden sich die zu entfernenden Partikel mindestens teilweise.

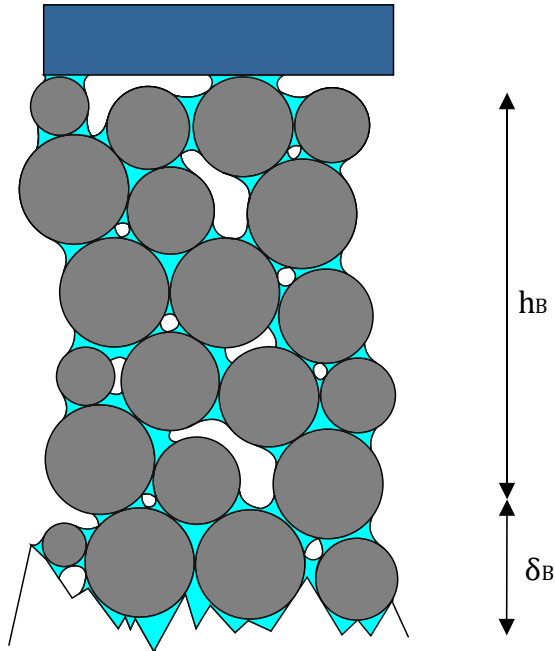


Abbildung 62: Initialer Zustand des Partikelkollektivs bei feuchter Reinigung

Die im feuchten Reinigungsprozess im gesamten Partikelkollektiv prävalenten Kapillarkräfte führen dazu, dass beim Fließen der Partikelschicht die Partikel der Randzone von den darüber liegenden Partikeln abgehoben werden. Durch die gleichzeitige laterale Bewegung wird folglich ein äußeres Rollmoment erzeugt. Im Reinigungsfall übersteigt das Rollmoment das innere Widerstandsmoment, welches durch Adhäsions- und Normalkräfte induziert wird. Es kommt im Reinigungsfall zunächst zu einem Abheben und im Anschluss zum Abrollen der Partikel. Wie in Kapitel 6.1 gezeigt werden konnte, wird die Adhäsion einzelner Partikel beim vertikalen Abheben wesentlich durch die freie Oberflächenenergie der Feststoffoberfläche bestimmt. Der Einfluss der interpartikulären Wechselwirkungen nimmt bei größeren Partikeln gegenüber der Gewichtskraft ab, sodass der reduzierte Einfluss der freien Oberflächenenergie auf das Reinigungsergebnis in größeren Partikelgrößenkanälen erklärt werden kann. Die (makroskopische) Rauheit übt aufgrund des Abhebens der Partikel keinen signifikanten Einfluss auf das Reinigungsergebnis aus.

Im System mit einem heterogenen Feuchtezustand ($h_A \neq 0$) kommt es hingegen primär zu einem Impulsübertrag, der interpartikulär stattfindet. Der Impulseintrag findet im Mittel in der Höhe des Massenschwerpunkts der Partikel statt, sodass es initial zu einem Abgleiten der Partikel von der Oberfläche kommt. Die Rauheit übt in diesem Zusammenhang eine mechanische Schutzwirkung aus, sodass diese Eigenschaft signifikant die Reinigbarkeit beeinflusst. Möglicherweise kommt es im weiteren Fließzustand zu einem kombinierten Gleit-Roll-Verhalten der Partikel.

In Abbildung 63 ist ein Überblick über die prävalenten Kräfte bei überwiegend trockenem und bei feuchtem Partikelsystem und den daraus resultierenden Ablösemechanismen gegeben.

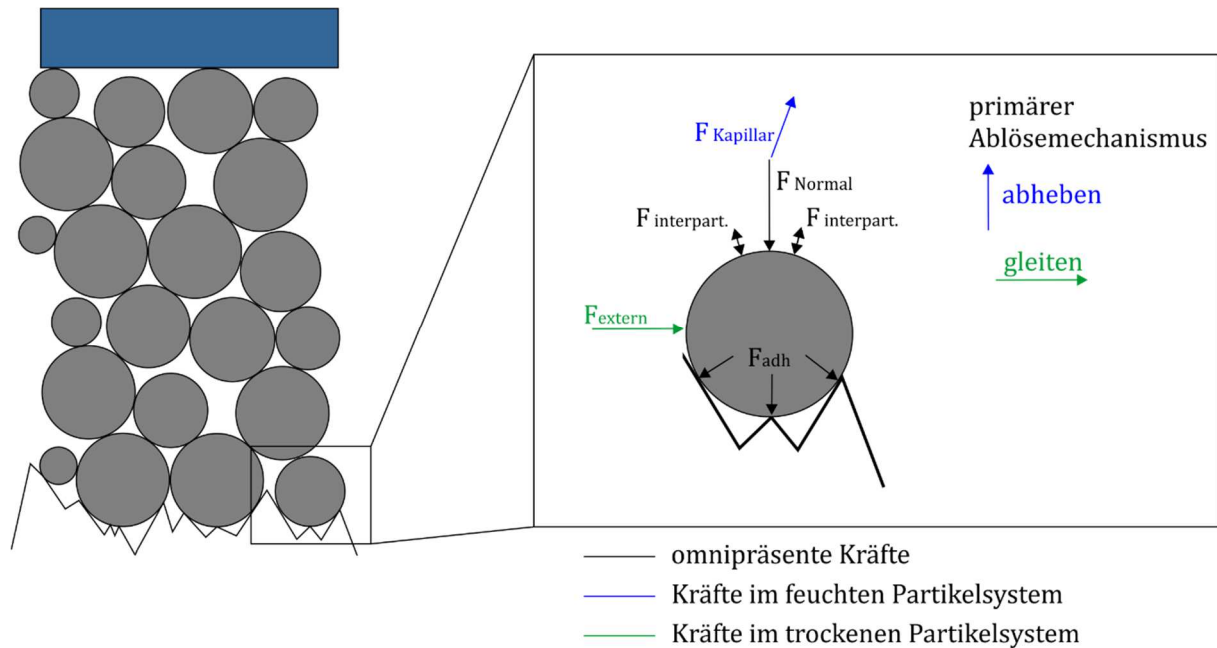


Abbildung 63: Kräftegleichgewicht und Ablösemechanismen von Partikeln

7.4 Methodenkritik

Der in den Reinigungsversuchen verwendete Versuchsaufbau ermöglicht ein reproduzierbares Vorgehen und ermöglicht somit eine systematische Untersuchung der Reinigbarkeit von Feststoffoberflächen und des Reinigungsprozesses im nicht-immernierten System. Große Streuungen sowie mögliche Messfehler resultieren entweder aus der Probenvorbereitung (möglicher Sekundärpartikeleintrag durch Sedimentation luftgetragener Partikel aus der Umgebung) oder aus den gewählten Auswertemethoden.

Der Partikelzähler mit angeschlossener Oberflächensonde weist auch in partikelfreier Umgebung eine geringe Partikelzählrate auf²³ [53]. Diese führt bei den Versuchen fälschlicherweise zu einer gemessenen Erhöhung der tatsächlich vorhandenen Partikelmenge. Dieser Fehler wird als marginal abgeschätzt, sodass er auf die Ergebnisse keinen nennenswerten Einfluss ausübt. Darüber hinaus sind die Schläuche, welche die Oberflächensonde mit dem Partikelzähler verbindet, als potentielle Fehlerquelle zu berücksichtigen. Die aus vorherigen Messungen in den Schlauchwänden anhaftenden Partikel können sich aufgrund von Erschütterungen während eines Messvorganges lösen und temporär zu einer deutlich erhöhten Partikelzählrate führen. Diese Fehlerquelle wird durch mehrmalige Filtermessungen zwischen den Probenahmen an den Prüfflächen deutlich reduziert, da hierbei keine luftgetragenen Partikel in den Partikelzähler gelangen und nur die Restpartikel

²³ Je nach verwendetem Gerät, Verwendung und Umgebung ist die Nullzählrate unterschiedlich hoch. Im Allgemeinen wird die Rate 1 [1/min] nicht überschritten.

im Schlauch angesaugt werden. Ferner wurden die Schläuche bei einer erwarteten Kontamination mit Stickstoff gespült.

Große Partikel ($d > 3,0 \mu\text{m}$) können mit dem hier verwendeten Messgerät möglicherweise nicht zuverlässig detektiert werden, da aufgrund der hohen Gewichtskraft großer Partikel der Extraktionsdruckluftstrom des Partikelzählers mit Oberflächensonde zu gering ist. Eine Methodenkontrolle wurde an vier Feststoffproben durchgeführt, wobei die Partikel nach der Reinigung in ein flüssiges Medium überführt wurden und anschließend die Partikelgrößenverteilung mittels Laserbeugung ermittelt wurde. Es konnte gezeigt werden, dass nach der Reinigung maximal 2% der verbliebenen Partikel Partikelgrößenkanälen mit $d > 3,0 \mu\text{m}$ zuzuordnen ist.

Es ist somit plausibel, dass nur sehr wenige Partikel in den groben Partikelgrößenkanälen ($d > 3,0 \mu\text{m}$) erfasst werden und nicht zwingend ein Messfehler vorliegt. Eine sinnvolle Modellierung der Reinigbarkeit ist mit den generierten Messwerten jedoch nicht möglich, da die quantitativen Unterschiede zwischen den untersuchten Feststoffoberflächen somit marginal sind. Die Bestimmtheitsmaße der ermittelten Modelle werden daher sehr gering ($R_{adj}^2 < 0,40$). Eine Auswertung der mit dem Partikelzähler erfassten Partikelgrößenkanäle $3,0 \mu\text{m} < d \leq 5,0 \mu\text{m}$, $5,0 \mu\text{m} < d \leq 10,0 \mu\text{m}$ und $d > 10,0 \mu\text{m}$ erfolgt aus diesem Grund nicht.

Mögliche Messfehler beim Streiflichtmessverfahren resultieren, wenn Rillen und Erhebungen der Feststoffoberfläche fälschlicherweise als Kontamination identifiziert werden, eine Kontamination nicht oder nur teilweise detektiert wird. Eine Kalibrierung der Beleuchtungsintensität für jede Oberfläche reduziert diesen Messfehler, erhöht jedoch stark den Messaufwand. Eine fehlerbehaftete Kalibrierung könnte erfolgen, wenn an einer verfärbten Stelle oder an einem lokalen Defekt kalibriert wird, die die optischen Eigenschaften der Probe verändert. Die Schwellwerte zur Identifikation als Kontamination sind abhängig von deren optischen Eigenschaften, die bei praktischen Randbedingungen jedoch nicht bekannt sind. Bei der Messgeometrie ist es wahrscheinlich, dass Partikelagglomerate aufgrund ihrer geometrischen Anordnung als ein großes Partikel gemessen werden und somit das Ergebnis verfälschen. Darüber hinaus werden Partikel, die ganz oder teilweise von der Oberflächenrauheit oder anderen Partikeln verdeckt werden nicht oder nicht korrekt erfasst. Anstelle der Partikelgrößen werden vielmehr Partikelsehnenlängen gemessen. Dieser Sachverhalt ist schematisch in Abbildung 64 dargestellt.

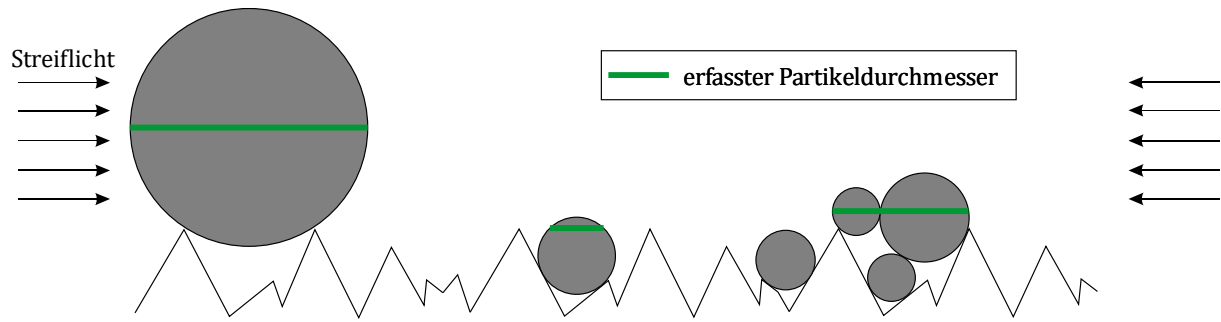


Abbildung 64: Partikelgrößenerfassung mit dem Streiflichtmessgerät

Eine direkte Vergleichbarkeit der mit dem Partikelzähler und mit dem Streiflichtmessgerät erzielten Messergebnisse ist nicht möglich, da sich zum einen die auswertbaren Messbereiche nicht überschneiden und zum anderen die Mengenart (Partikelanzahl bzw. Partikelsehnenfläche) sowie der Partikelzustand (Agglomerat bzw. Primärpartikel) nicht identisch sind.

Eine Methodenkontrolle zur Plausibilitätsprüfung der Messergebnisse wurde analog zu den Versuchen mit dem Partikelzähler durchgeführt. Eine qualitative Vergleichbarkeit mit den mittels Streiflichtmessung erzielten Ergebnissen bei den untersuchten Kontaminationen ist gegeben. Partikelgrößenkanäle, die Partikel $d > 50 \mu\text{m}$ beinhalten, werden nicht berücksichtigt, da nur sehr wenige Partikel dieser Größenordnung auf die Feststoffoberfläche aufgetragen wurden. Werden Partikel dieser Größe detektiert, ist die Messung eines Partikelagglomerats wahrscheinlich, welches wiederum die Modellvorstellung verfälscht. Deutlich reduzierte Bestimmtheitsmaße, die für erhöhte nicht erklärbare Streuungen der Messwerte stehen, sind die Folge.

Partikel im Bereich $d < 0,3 \mu\text{m}$ und $3 \mu\text{m} < d < 5 \mu\text{m}$ wurden mit den hier verwendeten Messverfahren nicht abgedeckt. Es wird angenommen, dass sich qualitativ das gleiche Reinigungsverhalten bei Kontaminationen in diesem Größenbereich zeigt.

7.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse

- Die Reinigbarkeit von Feststoffoberflächen hängt von ihren Oberflächeneigenschaften ab.
- Die alleinige Bestimmung von Adhäsionskräften zwischen einem Partikel und einer Feststoffoberfläche ermöglicht nur bedingt Aussagen zur Reinigbarkeit derselbigen.
- Je größer die zu entfernenden Partikel, umso größer ist der Einfluss der mechanischen Komponente gegenüber der oberflächenphysikalischen Komponente bei der Reinigung.
- Je größer der Quotient aus Partikeldurchmesser (d) und Oberflächeneigenschaft (R_a oder γ_s), umso geringer ist der absolute Einfluss der Oberfläche auf das Reinigungsergebnis.

- Unterschiedliche Kontaminationen (Variation in d_{50} , ff_c etc.) können unterschiedlich gut abgereinigt werden, die Reinigbarkeit der Feststoffoberflächen ist jedoch qualitativ vergleichbar.
- Der Feuchtezustand im Partikelkollektiv beeinflusst maßgeblich den Reinigungserfolg (geringerer Partikelrückstand) sowie die vorliegenden Reinigungsmechanismen.
- Die aus der Literatur bekannten Reinigungsmechanismen und -kinetiken des immmergierten Systems stimmen nicht mit den vorherrschenden Prozessen im nicht-immmergierten System überein.
- Die Restpartikelmenge wird signifikant durch die Reinigungsgeschwindigkeit, die Wischhubanzahl und die Partikelkonzentration bestimmt.
- Eine Randzone bildet sich in unmittelbarer Nähe zur Feststoffoberfläche aus, die lediglich eine eingeschränkte interpartikuläre Impulsübertragung zulässt und den Reinigungsvorgang wesentlich beeinflusst. Die Randzonendicke ist abhängig von diversen Faktoren (R_a , freie Oberflächenenergie, ff_c , d etc.).
- Eine Mindestscherrate und -schubspannung müssen an der Kontamination anliegen, um einen Reinigungsvorgang zu ermöglichen.
- Die Messmethoden zur Bestimmung der Restkontamination auf den Feststoffoberflächen weisen eine starke Streuung auf und machen somit für eine sinnvolle Auswertung eine große Stichprobe erforderlich; der Partikelzähler mit angeschlossener Oberflächensonde ist vorrangig für feine Partikel und das Streiflichtmessgerät tendenziell für grobe Partikel geeignet.

8 Wirkzusammenhänge der Persistenz von Mikroorganismen

Die Minimierung mikrobieller Kontaminationen, die auf Oberflächen in Krankenhäusern ein Erregerreservoir darstellen, ist eine wichtige Maßnahme zur Reduzierung des Risikos einer nosokomialen Infektion. Neben regelmäßiger Flächendesinfektion könnte auch die Wahl geeigneter Materialien einen Beitrag zur Senkung dieses Risikos leisten. Die Datenlage, die das Überdauern von verschiedenen Mikroorganismen auf unterschiedlichen Materialien beschreibt (Persistenz), ist allerdings inkonsistent und der Einfluss von Oberflächeneigenschaften weitgehend unerforscht.

8.1 Allgemeiner Hinweis zur Sterberate

Zur Bestimmung der Sterberate wird eine einfache Regression durch die koloniebildenden Einheiten *KBE* auf den Probenkörpern in Abhängigkeit der Zeit t [h] durchgeführt. Die Steigung der Regressionsgeraden (Gl. (45)) gibt dabei die Sterberate k [h^{-1}] an.

$$KBE(t) = k \cdot t + KBE(0) \quad (45)$$

Die Sterberate verhält sich reziprok zur Persistenz. Um einen Vergleich mit anderen bisher durchgeführten Studien zu ermöglichen, wurde die Persistenz von *S. aureus* für jeweils sechs Proben pro Materialgruppe über die Sterberaten bewertet.

8.2 Einfluss der Oberflächeneigenschaften

Die Ergebnisse der Zellzahlbestimmung von einem *S. aureus* – einem gram-positiven Bakterium – an den Edelstahl- und Polymerproben können exemplarisch der Abbildung 65 entnommen werden. Es sind jeweils die logarithmierten Mittelwerte und Standardabweichungen zu den Probennahmezeitpunkten ($t = 0, 3, 24$ und 72 h) dargestellt. Initial (Zeitpunkt $t = 0$ h) wurden etwa $4 \cdot 10^4$ bis $5 \cdot 10^4$ KBE auf die Feststoffoberflächen aufgetragen. Im Zeitverlauf reduzierte sich die Zellzahl so stark, dass teilweise keine Keime mehr nachweisbar waren ($\log(1) = 0$).

An sechs Edelstahl- und sechs Polymerproben wurden je untersuchtem Zeitpunkt bei der Probennahme sechs unabhängige Wiederholungen zur Zellzahlbestimmung durchgeführt. Darüber hinaus wurden an vier Polymerproben (P4, P5, P10 und P12) je untersuchtem Zeitpunkt drei unabhängige Wiederholungen durchgeführt. Tabelle 26 zeigt die für diese Proben ermittelte Sterberate von *S. aureus*.

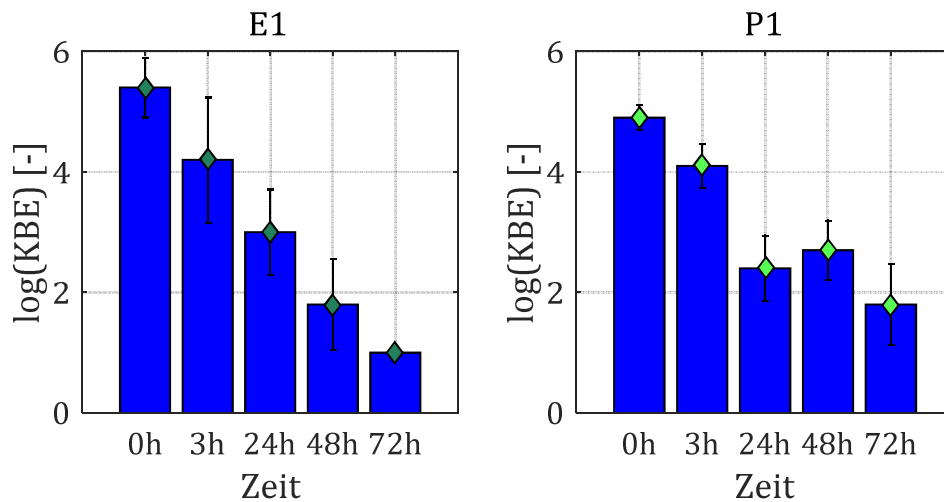


Abbildung 65: Logarithmierte Zellzahl KBE von *Staphylococcus aureus* zur Inkubationszeit t auf den Proben E1 und P1

Tabelle 26: Sterberate von *Staphylococcus aureus* auf ausgewählten Proben

Probe	Sterberate [1/h]	Probe	Sterberate [1/h]	Probe	Sterberate [1/h]
E1	-0,057226	E5	-0,033454	P11	-0,035245
E2	-0,025146	E6	-0,034775	P13	-0,035558
E3	-0,041759	P1	-0,039100	P14	-0,026890
E4	-0,034785	P7	-0,102480	P15	-0,021585

Die Sterberaten der Edelstahlproben reichen von der längsten Persistenz mit $-0,025146 \log(\text{KBE})/\text{h}$ bis zur kürzesten Persistenz mit $-0,057226 \log(\text{KBE})/\text{h}$. Bei den Polymerproben liegen die Sterberaten zwischen $-0,021585 \log(\text{KBE})/\text{h}$ bis $-0,10248 \log(\text{KBE})/\text{h}$. Abbildung 66 zeigt die Sterberaten aufgetragen über die Rauheit für die beiden untersuchten Materialgruppen. Innerhalb der Materialgruppen hatten Proben mit großem R_a -Wert tendenziell höhere Sterberaten als Proben mit kleinem R_a -Wert.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wird ein Verhaltensmodell entwickelt, welches in Abhängigkeit von den Oberflächeneigenschaften (Rauheit, freie Oberflächenenergie) einer Probe, die KBE zu einem bestimmten Zeitpunkt abschätzt:

$$KBE = e^{b_i \cdot R_a + b_j \cdot \gamma_s + b_{ij} \cdot R_a \cdot \gamma_s + b_k \cdot t} \quad (46)$$

Bei den zugrunde liegenden Daten sind die Zeit t , die Rauheit R_a , die freie Oberflächenenergie γ_s und ein Wechselwirkungsparameter der beiden letztgenannten Parameter signifikant. Die Koeffizienten b und die Signifikanzniveaus α für die Gleichung (46) sind der Tabelle 27 zu entnehmen.

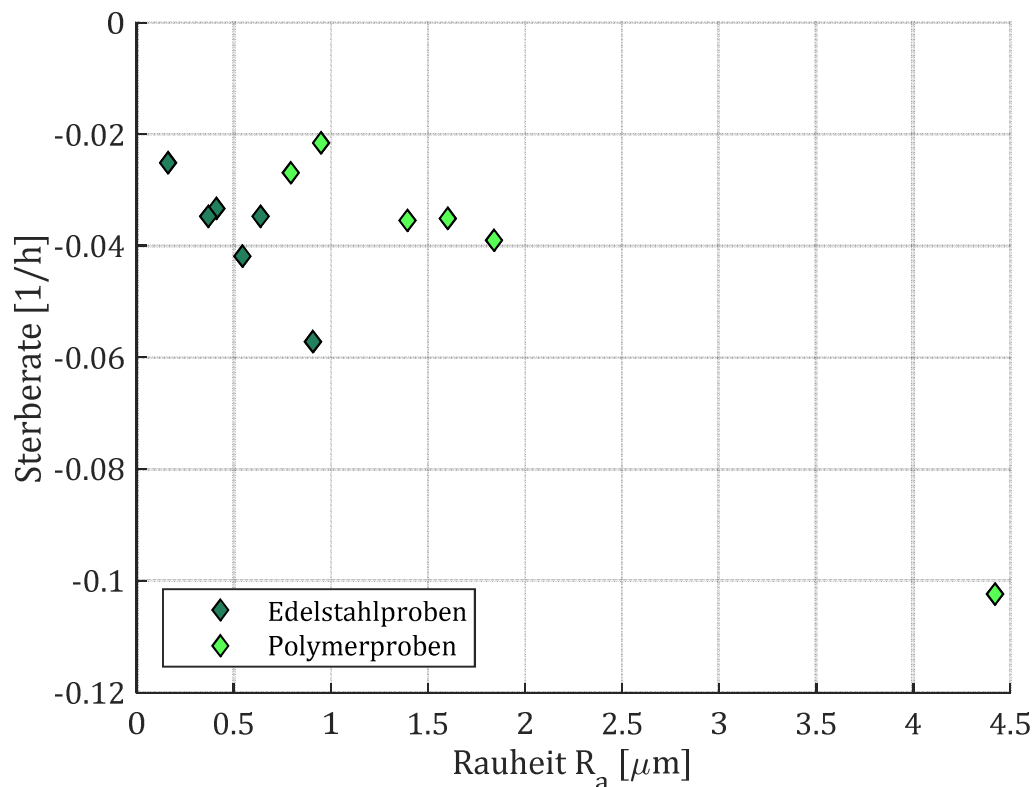


Abbildung 66: Sterberate von *Staphylococcus aureus* auf verschiedenen Materialien (Edelstahl- und Polymerproben) in Abhängigkeit von der Rauheit R_a

Tabelle 27: Koeffizienten b und Signifikanzniveau α zur Beschreibung der Persistenz von *S. aureus* auf Edelstahl- und Polymeroberflächen

	b	α
R_a [μm]	4,1245	0
γ_s [mN/m]	0,1569	0
$R_a \gamma_s$ [nN]	-0,1443	$7 \cdot 10^{-28}$
t	-0,0357	$3 \cdot 10^{-32}$
R_{adj}^2		0,92

Eine zunehmende Oberflächenrauheit reduziert die Persistenz der sich auf dem Material befindlichen Mikroorganismen. Eine niedrige freie Oberflächenenergie erhöht die Überlebensdauer von *S. aureus*. Mit fortschreitender Zeit sind auf den Feststoffoberflächen weniger KBE nachzuweisen.

Da das Persistenzverhalten von *S. aureus* aufgrund der Vielzahl der signifikanten Einflussfaktoren nicht im dreidimensionalen Raum darstellbar ist, wurde in Abbildung 67 zur grafischen Darstellung eine freie Oberflächenenergie von $\gamma_s = 27$ mN/m gewählt, da dies etwa dem Mittelwert des untersuchten γ_s -Spektrums entspricht.

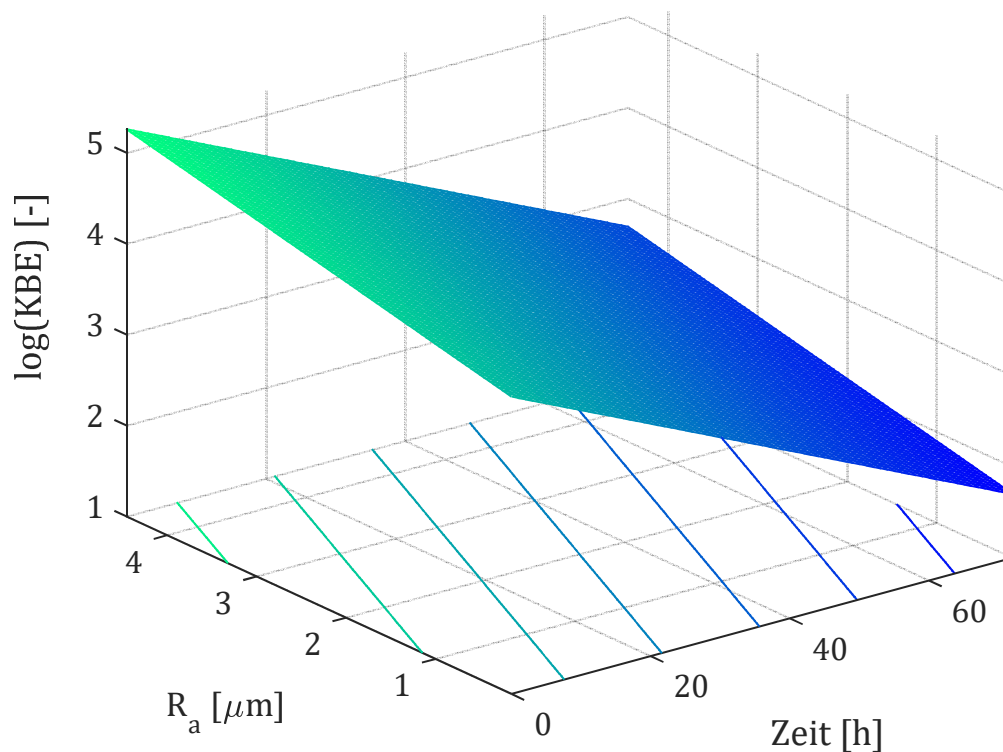


Abbildung 67: Verhaltensmodell der Persistenz von *Staphylococcus aureus* auf Edelstahl- und Polymeroberflächen zur Beschreibung der Zellzahl ($\log(KBE)$) in Abhängigkeit von der Rauheit R_a und der Zeit t mit einer freien Oberflächenenergie von $\gamma_s=27 \text{ mN/m}$ ($n=200$, $R_{adj}^2=0,92$)

Die Abhängigkeit der Persistenz auf trockenen Oberflächen vom Material, wie sie in vorherigen Studien beobachtet wurde [102, 132, 139, 207], konnte anhand der in dieser Studie ermittelten Sterberaten von *S. aureus* für Polymer- und Edelstahlproben bestätigt werden. Die Sterberaten der Polymerproben waren tendenziell kleiner als die der Edelstahloberflächen. Bei den Proben E5 und P14, die einen ähnlichen R_a -Wert aufweisen (Differenz $0,0044 \mu m$), war die Sterberate auf der Polymerprobe P14 um $0,006564 \log(KBE)/h$ kleiner als auf der Edelstahloberfläche E5. Dies bedeutet, dass bei einer Ausgangszellzahl von 10^5 KBE/Probenkörper *S. aureus* auf der Polymerprobe 36 h länger überleben würde als auf einer vergleichbaren Edelstahloberfläche.

Ferner wurde gezeigt, dass auch die Oberflächeneigenschaften Rauheit sowie die freie Oberflächenenergie die Persistenz von *S. aureus* beeinflussen. Dies könnte auch die Inkonsistenzen in bisherigen Studien [102] zur Persistenz auf unterschiedlichen Materialien erklären. Studien von PÉREZ ET AL. und NEELY bestätigen eine verlängerte Persistenz von Bakterien auf PVC [132, 139]. WEBSTER ET AL. beobachteten eine längere Persistenz von *S. aureus* und *Acinetobacter baumannii* (*A. baumannii*) auf Edelstahl, als auf Formica-Laminat [207]. WAGENVOORT ET AL. stellten eine geringere Sterberate ($0,0016 \log(KBE)/h$) in Flaschen fest [205]. Dies kann auf die dort höhere Ausgangszellzahl (10^9

KBE/Probenkörper) und das langsamere Eintrocknen über 10 Tage zurückgeführt werden. Diese Abweichungen zeigen, wie wichtig es ist, Randbedingungen bei der Bestimmung der Persistenz möglichst umfassend zu kontrollieren oder aufzuzeichnen. In zukünftigen Versuchen sollten die Oberflächeneigenschaften daher immer mitbestimmt werden, um nicht erklärbare Effekte zu vermeiden.

Durch eine Erweiterung des Parameterbereichs bei Feststoffoberflächen (z. B. größere Rauheit) könnte zukünftig untersucht werden, inwiefern das Modell extrapolierbar ist. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass hier noch nicht berücksichtigte Faktoren ebenfalls einen signifikanten Effekt haben. Denkbare weitere Einflussfaktoren sind Weichmacher, Farb- und Füllstoffe, die durch *S. aureus* metabolisierbare Bestandteile in den Polymerfeststoffen darstellen. Außerdem ist bekannt, dass einige Metalle (z. B. Kupfer, Silber, Gold) eine oligodynamische Wirkung haben und durch die Abgabe von Metallionen Krankheitserreger schädigen und somit deren Persistenz stark verringern [49, 67]. Tritt dieser biozide Effekt auf, ist das Modell ungültig. Grundsätzlich zeigt sich jedoch anhand des hohen Bestimmtheitsmaßes des Modells, dass bereits eine sehr gute Anpassung an das Verhalten des untersuchten Erregers gefunden wurde.

Im untersuchten Parameterspektrum sind raue Materialien mit hoher Oberflächenenergie einer geringeren Persistenz zuträglich. Dies könnte aus einem unterschiedlichen Wasser- und Sauerstoffangebot für die einzelne KBE resultieren. Die günstigen Oberflächeneigenschaften stehen allerdings im Widerspruch zur guten Reinigbarkeit der Materialien, die wiederum entgegengesetzte Oberflächeneigenschaften erfordern. Bei schlecht gereinigten Materialien könnte der Kontaminationsrückstand die Grundlage für eine Nährstoffmatrix bieten, die die Persistenz wiederum erhöht [133]. Unter praktischen Gesichtspunkten ist dies zu berücksichtigen. Die Ursache für die geringere Persistenz auf Oberflächen mit größerer Rauheit konnte durch diese Arbeit nicht geklärt werden.

Es bleibt zu untersuchen, ob andere Mikroorganismen ein ähnliches Verhalten auf den Materialien aufweisen. Denkbar ist, dass sich bestimmte Stämme entgegen der Feststellung dieser Studie verhalten. Dies könnte Ausbruchstämmen aus trockenen Isolationsquellen betreffen, die in vorherigen Studien eine erhöhte Persistenz auf trockenen Oberflächen aufwiesen [205, 211]. Weiterhin könnte das Verhältnis von Zellgröße und -morphologie zu Rauheit einen Einflussfaktor auf die Persistenz darstellen, da dies wesentlich den Kontakt zur Oberfläche bestimmt. Während die Rautiefe der Edelstähle etwa der Keimgröße entsprach, war sie bei den Polymerproben deutlich größer. Ferner könnte die Persistenz durch die Oberflächenladung eines Keimes beeinflusst werden – dies bedarf jedoch weiterer Untersuchungen.

8.3 Einfluss der Erreger

Ob die Persistenz von allen Mikroorganismen von den Oberflächeneigenschaften der kontaminierten Proben abhängig ist, ist bisher unklar. Auf Edelstählen (E1-6) wird die Persistenz von weiteren wichtigen pathogenen Erregern daher untersucht (vgl. Kapitel 2.1). Neben dem *S. aureus* kommen *Ps. aeruginosa*, ein gram-negatives Stäbchenbakterium, *C.*

albicans, ein Hefepilz sowie *A. baumannii*, ein gram-negatives Bakterium zum Einsatz. Nach 3h, 24h, 48h und 72h werden die KBE auf den Proben bestimmt. Für die Probe E6 ist das Ergebnis der unterschiedlichen Erreger in Abbildung 68 dargestellt. Die vollständigen Ergebnisse dieser Untersuchung sind dem Anhang zu entnehmen. Bei allen untersuchten Erregern weist der *S. aureus* die höchste Persistenz auf. *Ps. aeruginosa*, *C. albicans* und *A. baumannii* können innerhalb der untersuchten Zeitintervalle nicht durchgängig nachgewiesen werden, sodass eine Sterberate nicht zuverlässig zu ermitteln ist. Festzustellen ist folglich, dass die Sterberaten von verschiedenen Erregern unterschiedlich hoch sind. Eine Abhängigkeit derselbigen von den Oberflächeneigenschaften ist auch hier wahrscheinlich.

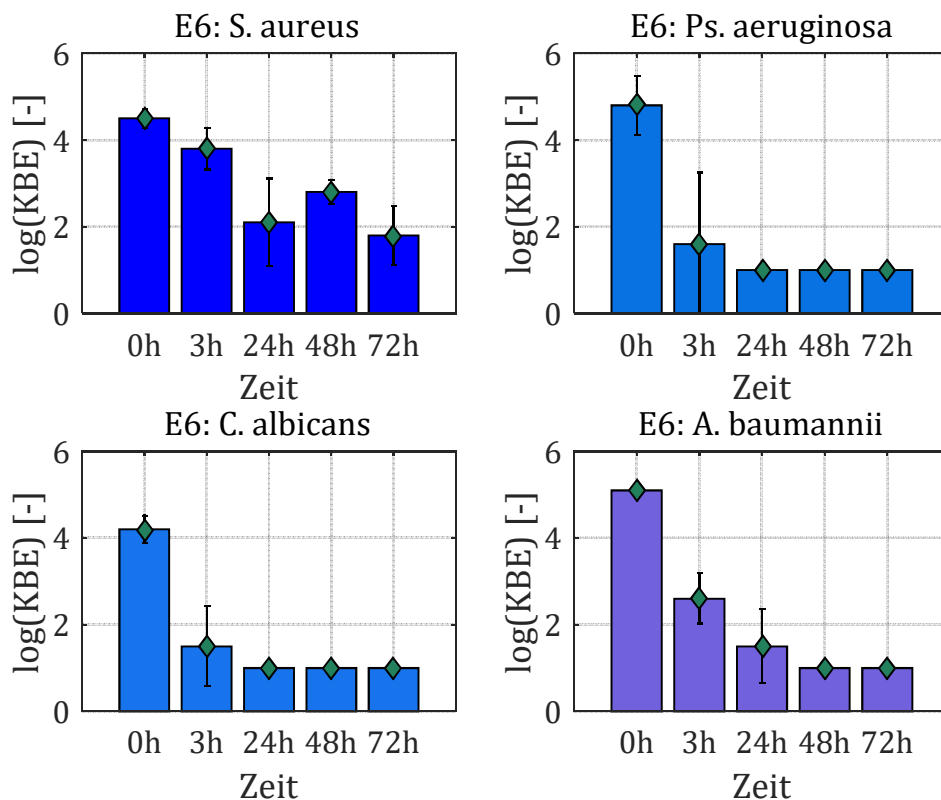


Abbildung 68: Logarithmierte Zellzahl KBE von *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*), *Pseudomonas aeruginosa* (*Ps. aeruginosa*), *Candida albicans* (*C. albicans*) und *Acinetobacter baumannii* (*A. baumannii*) auf dem Probekörper E6 zu unterschiedlichen Zeitpunkten

8.4 Einfluss der Oligodynamik

Der Einfluss von oligodynamischen Materialien auf die Persistenz von *S. aureus* wird anhand von Kupferoberflächen (K1-4) untersucht. Deren Oberflächeneigenschaften sind in dem in Kapitel 8.2 untersuchten Parameterraum eingeschlossen und sollten dennoch ein deutlich anderes Persistenzverhalten aufweisen.

Bereits nach 3 h ist auf allen Proben kein Erreger mehr nachweisbar (vgl. Abbildung 69). Es kann somit bestätigt werden, dass das ermittelte Verhaltensmodell nicht für oligodynamische Materialien anwendbar ist.

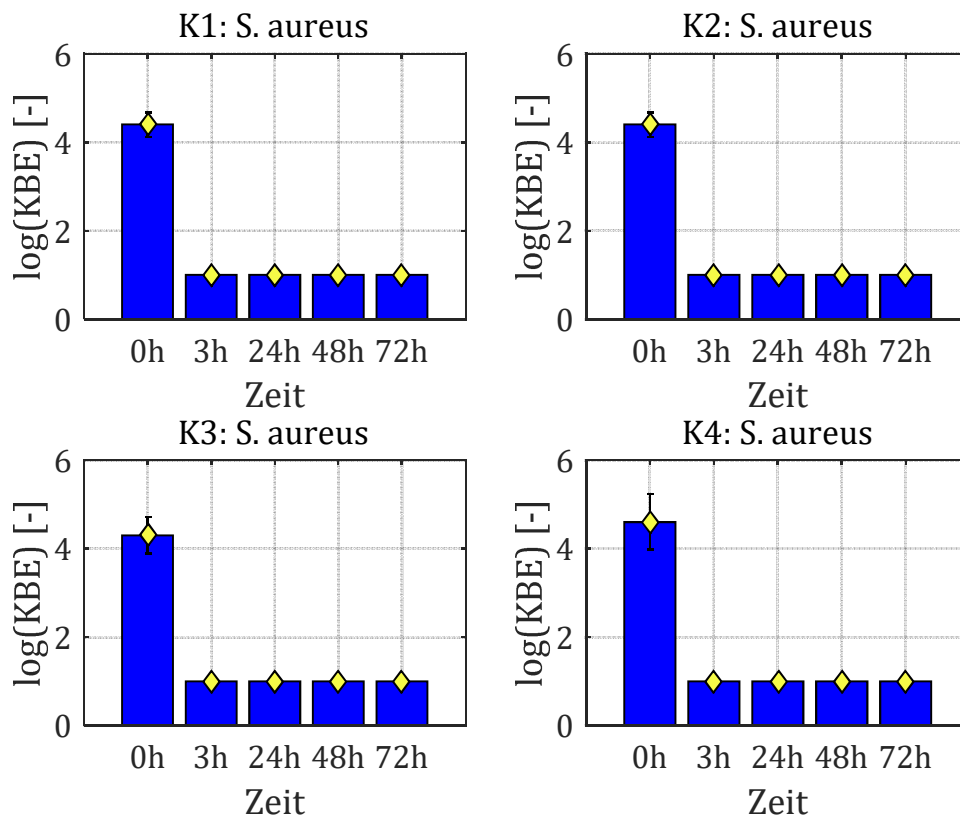


Abbildung 69: Logarithmierte Zellzahl KBE von *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) auf den Probekörpern K1-4 zu unterschiedlichen Zeitpunkten

8.5 Methodenkritik

Die insitu-Randbedingungen auf krankenhausüblichen Oberflächen können mit dem hier verwendeten Versuchsaufbau nicht abgebildet werden. Die Persistenz von *S. aureus* kann daher unter tatsächlichen Bedingungen von den hier ermittelten Ergebnissen abweichen. Die Versuche sind geeignet, um reproduzierbar den Einfluss von Oberflächeneigenschaften auf die Persistenz von Mikroorganismen zu untersuchen.

Es handelt sich bei dem verwendeten Versuchsaufbau nicht um ein genormtes Vorgehen, sodass die Probennahme anzuzweifeln ist. Um zu untersuchen, ob nach der Probennahme keine wesentlichen Rückstände auf der Oberfläche verbleiben und die gemessenen Zellzahlen somit den realen Werten auf den Feststoffoberflächen entsprechen, wurde exemplarisch ein Probekörper aus jeder Gruppe nach der Kontamination und nach dem Ausschütteln gefärbt (Filmtracer LIVE/DEAD Biofilm Viability Kit, ThermoFisherScientific, Waltham, USA) und mittels Fluoreszenzmikroskopie (Axio Imager.M2, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) ausgewertet. Wie in Abbildung 70 gezeigt, konnte keine wesentliche mikrobielle Aktivität nach der Probennahme festgestellt werden.

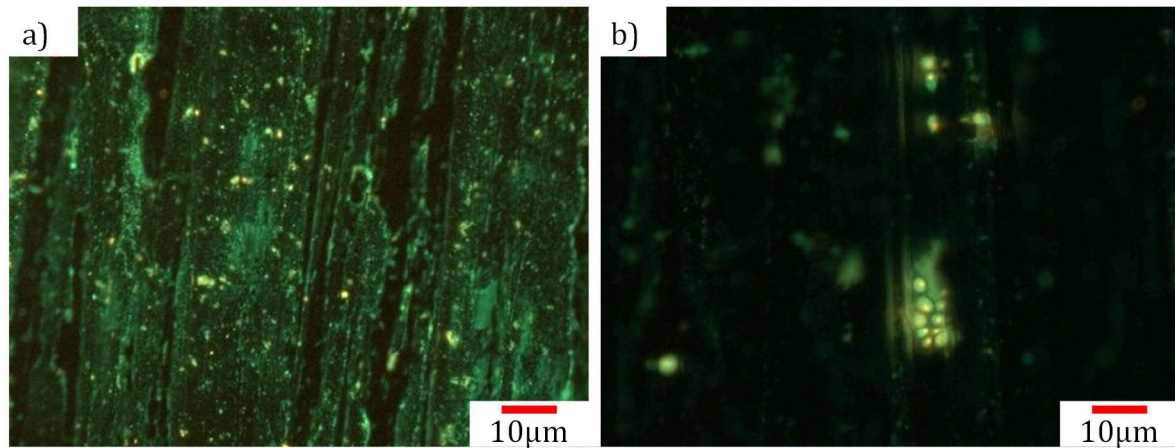


Abbildung 70: Methodenkontrolle: *C. albicans* auf Edelstahl a) vor der Probennahme und b) nach der Probennahme

Die hier untersuchten Proben können insitu aufgrund von chemischen (z. B. Reinigungsmittel), mechanischen oder thermischen Einwirkungen Alterungserscheinungen aufweisen. Dies kann u. a. Risse, Quellung oder Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Materials verursachen [40]. Es ist daher davon auszugehen, dass sich die Rauheit und die freie Oberflächenenergie im Laufe der Nutzungsphase verändern, was sich folglich auch auf die Persistenz auswirken dürfte. Dieser Einflussfaktor wurde mit der hier dargestellten Methode nicht untersucht.

Darüber hinaus gilt es noch zu untersuchen, ob verschiedene Erreger miteinander wechselwirken und sich deren Persistenz somit verändert. Hierbei sollte auch der mögliche Einfluss der Luftfeuchte überprüft werden.

8.6 Zusammenfassung der Erkenntnisse

- Unterschiedliche Mikroorganismen weisen unterschiedliche Persistenzen unter ansonsten gleichen Randbedingungen auf (hier untersucht: *S. aureus*, *Ps. aeruginosa*, *C. albicans* und *A. baumannii*).
- Eine hohe Rauheit sowie eine hohe freie Oberflächenenergie reduzieren die Überlebensdauer von *S. aureus* auf Polymer- und Edelstahloberflächen; dies könnte die Inkonsistenzen bisheriger Studien erklären.
- Die Überlebensdauer von Erregern auf oligodynamischen Materialien (einhergehend mit einer Metallionenabgabe) ist stark reduziert.
- Die Persistenz von *S. aureus* beträgt bei den hier untersuchten Randbedingungen i. d. R. >72 h; die Überlebensdauer dieses Erregers übersteigt den Zeitraum, der zwischen zwei krankenhausblichen Reinigungszyklen liegt und macht deren Entfernung im Reinigungsprozess relevant.

9 Zusammenfassung, Empfehlung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung und Empfehlung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es hygienesichere Oberflächen im nicht-immernierten System zu untersuchen. Hierbei ist *Hygienesicherheit* als Eigenschaft zu verstehen, die aus dem minimierten Übertragungspotential nosokomialer Infektionen resultiert. Im Detail waren die Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus der Adhäsionskraftmessung mit runden Einzelpartikeln auf den Reinigungsversuch, die Vorgänge beim Reinigungsprozess, die Beeinflussbarkeit des Reinigungserfolges durch Oberflächeneigenschaften und Prozessparameter zu klären sowie Persistenzversuche mit verschiedenen pathogenen Erregern durchzuführen, um die Eigenschaft Hygienesicherheit in eine messbare Größe zu überführen.

Um die genannten Fragestellungen beantworten zu können, war zunächst eine Charakterisierung von Feststoffoberflächen, die üblicherweise in Krankenhäusern und anderen hygienekritischen Bereichen angewendet werden, erforderlich. Ferner waren die gewählten inerten Partikelsysteme, die als Modellkontamination dienten, hinsichtlich ihrer Eigenschaften zu beschreiben.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse der Versuche zusammengefasst und diskutiert.

Erkenntnisse aus der Adhäsionskraftmessung mittels Colloid Probe Technique

Der Zusammenhang zwischen der freien Oberflächenenergie und der Adhäsionskraft zwischen einem sphärischen, starren Partikel und einer weitestgehend adsorbatfreien Feststoffoberfläche ist gegeben. Die theoretischen Modelle können somit prinzipiell bestätigt werden, jedoch sind die Messergebnisse quantitativ deutlich unter den kalkulierten Werten, da keine ideal glatten Kontaktpartner vorliegen. Eine Reduktion der Adhäsionskraft mit Zunahme der (lokalen) Mikrorauheit konnte gezeigt werden.

Es wurde festgestellt, dass mit zunehmender Partikelgröße die Adhäsionskräfte zwischen Partikel und Feststoffoberfläche überproportional ansteigen. Ferner ist das E-Modul des Partikels bei der Adhäsionskraftmessung mit sphärischen Partikeln von zentraler Bedeutung, da bei starken Deformationen des Partikels veränderte Kontaktgeometrien auftreten. Aufgrund der Kraft-Weg-Kurven wird vermutet, dass der Vorgang der Partikelentfernung von weichen Partikeln nicht eindeutig zu lokalisieren ist und es eher zu einem sukzessiven Ablösen kommt. Bei einer mit Tensiden gereinigten Feststoffoberfläche wird ein Anstieg der Adhäsionskräfte gemessen, welcher auf eine Veränderung der Grenzfläche zurückgeführt wird.

Da die relative Luftfeuchte unter praxisrelevanten Umgebungsbedingungen >0% beträgt, wurden Adhäsionskräfte zwischen Partikeln und Feststoffoberflächen auch bei 25% und 50% r. F. gemessen. Hierbei kam es lediglich zu einer geringfügigen Änderung der absoluten Adhäsionskraft aufgrund von Kapillarkräften. Bei den hier betrachteten technischen

Feststoffoberflächen war die Höhe der freien Oberflächenenergie entscheidend, ob es zu einer Erhöhung oder einer Reduktion der Adhäsionskraft kam. Die Erhöhung der attraktiven Kräfte konnte auf die stärker ausgeprägten Kapillarbrücken zurückgeführt werden und die Reduktion der Kräfte gegenüber der Messung im Vakuum auf eine stärker benetzte Feststoffoberfläche, die den Abstand der Kontaktpartner erhöht.

Erkenntnisse aus den Reinigungsversuchen

Es wurden Reinigungsversuche im Scheuer-Wisch-Verfahren durchgeführt und die Restpartikelmenge als Maß der Reinigbarkeit auf den Feststoffoberflächen bestimmt. Hierfür kamen in Abhängigkeit von dem Partikelsystem ein Partikelzähler mit angeschlossener Oberflächensonde (feine Partikel) oder ein Streiflichtmessgerät (grobe Partikel) zum Einsatz.

Die Reinigbarkeit konnte unabhängig von der partikulären Kontamination mit den Oberflächeneigenschaften der Feststoffoberfläche in Zusammenhang gebracht werden. Sowohl eine steigende Rauheit als auch eine steigende freie Oberflächenenergie führen zu einer erhöhten Restpartikelmenge. Je größer die abzureinigenden Partikel, umso stärker beeinflusst die mechanische Komponente (Parameter Rauheit) gegenüber der oberflächenphysikalischen Komponente (Parameter freie Oberflächenenergie) das Reinigungsergebnis. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass sich eine hohe Reinigungsgeschwindigkeit sowie eine hohe initiale Kontamination negativ auf die Restpartikelmenge auswirken. Bei der Erhöhung der Wischhubanzahl nähert sich die detektierte Restpartikelanzahl einem Grenzwert an. Der Feuchtezustand der Kontamination bestimmt maßgeblich die signifikanten Oberflächeneigenschaften, welche mit der Reinigbarkeit der Feststoffoberfläche korrelieren und bestimmt die Reinigungsmechanismen (gleiten oder abheben), die vorliegen.

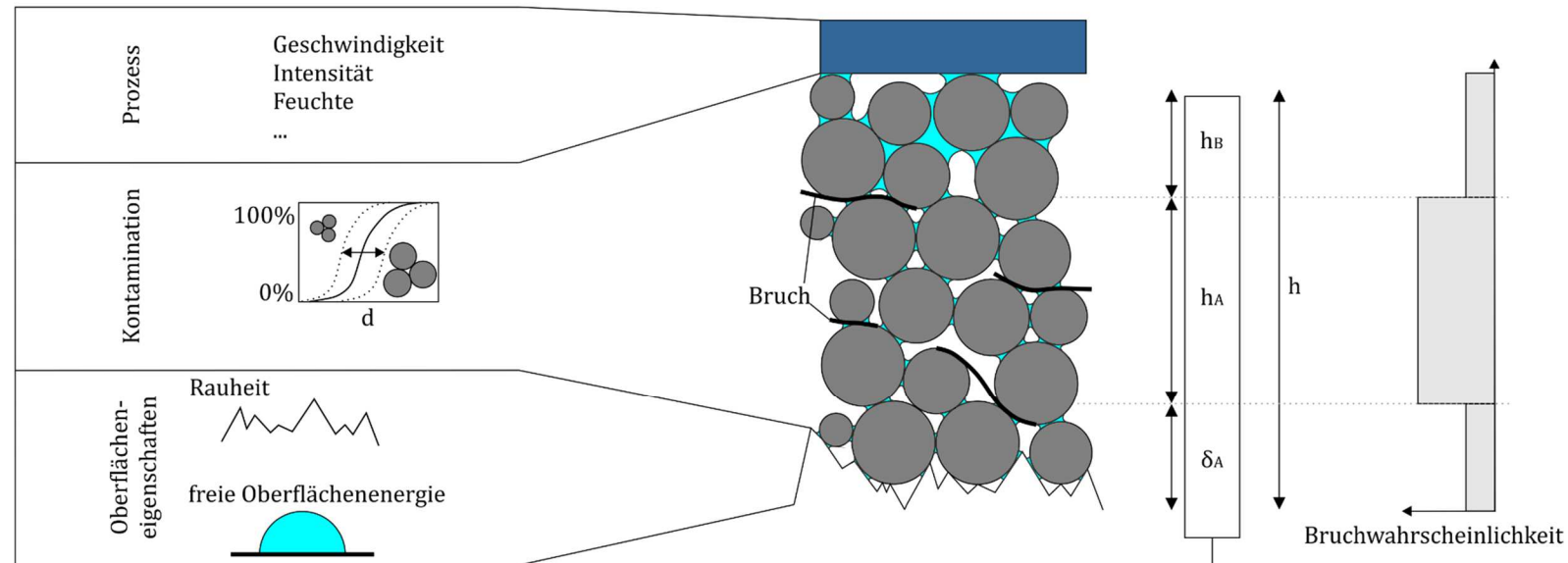
Neben der quantitativen Beschreibung der genannten Zusammenhänge wurde ein qualitatives Modell entwickelt, welches die genannten Phänomene physikalisch erklärt. Eine zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Erkenntnisse ist in Abbildung 71 gegeben.

Erkenntnisse aus den Versuchen zur Persistenz von pathogenen Erregern

Die Zellzahl von verschiedenen relevanten, pathogenen Erregern (*Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans*, *Acinetobacter baumannii*) wurde zu unterschiedlichen Zeitpunkten unter krankenhausüblichen Randbedingungen auf unbelebten Feststoffoberflächen bestimmt. Eine Abhängigkeit der Überlebensdauer des Erregers *Staphylococcus aureus* von den Oberflächeneigenschaften von Edelstahl- und Polymerproben wurde festgestellt. Im untersuchten Parameterspektrum erhöhten eine niedrige Rauheit sowie eine niedrige freie Oberflächenenergie die Persistenz des pathogenen Erregers. Bei weiteren Untersuchungen mit anderen Erregern ergaben sich abweichende Persistenzen. Auf die Versuche mit oligodynamischen Feststoffen konnten die quantifizierten Zusammenhänge nicht bestätigt werden. Dies ist vermutlich auf die erhebliche

schädigende Wirkung der Metallionenabgabe auf die Erreger zurück zu führen. Die Überlebensdauer der Erreger hängt somit stärker von der Materialwahl als von den Oberflächeneigenschaften ab.

I. Randbedingung



III. Ergebnis (Result)

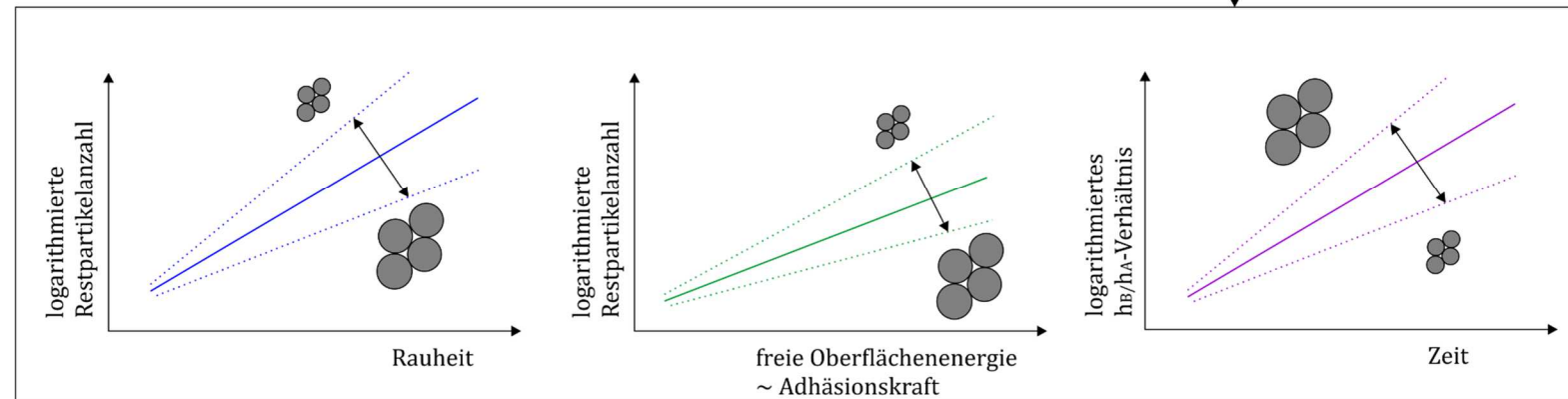


Abbildung 71: Schematische Darstellung des Einflusses der prozessualen, partikulären und oberflächenphysikalischen Randbedingungen auf den Reinigungsvorgang und das Reinigungsergebnis

Empfehlungen für die Praxis

Für die Umsetzung der erlangten Erkenntnisse in die Praxis werden folgende Empfehlungen gegeben:

- Möglichst geringe Rauheit und freie Oberflächenenergie der Materialien wählen, da es sich um einen exponentiellen Zusammenhang zwischen den Oberflächeneigenschaften und der Reinigbarkeit handelt. Die gleichzeitige Gewährleistung von geforderten Eigenschaften wie beispielsweise der Rutschsicherheit ist dabei zu berücksichtigen.
- Sind die Oberflächeneigenschaften der Feststoffoberfläche nicht frei wählbar, ist es bei zu erwartenden gröberen Kontaminationen sinnvoller Feststoffoberflächen mit geringer Rauheit anstelle mit geringer freier Oberflächenenergie zu wählen, da bei groben Kontaminationen die mechanischen gegenüber den oberflächenphysikalischen Faktoren den größeren Einfluss auf die Reinigbarkeit ausüben.
- Um Materialien hinsichtlich ihrer Reinigbarkeit bei partikulärer Kontamination zu beurteilen, ist die Bestimmung der makroskopischen Rauheit und der freien Oberflächenenergie zielführend.
- In den Versuchen wurde gezeigt, dass die Restpartikelmenge nach der Reinigung in Abhängigkeit von der Anzahl der Wischhübe einer Potenzfunktion folgt und sich asymptotisch an einen Grenzwert annähert. Im hier verwendeten Versuchsstand liegt die wirtschaftliche Empfehlung bei zwei Wischhuben, da bei mehr als einem Wischhub eine deutliche Reduktion des Partikelrückstandes erzielt werden kann und bei mehr als zwei Wischhuben keine deutliche Änderung der Restpartikelmenge auftritt. Für die Randbedingungen eines anderen Reinigungsverfahrens ist es daher empfehlenswert den wirtschaftlich sinnvollen Bereich der Reinigungssintensität zu eruieren.
- Wird mit dem Scheuer-Wisch-Verfahren gereinigt, sollte regelmäßig das Reinigungstuch getauscht oder über ein Spülverfahren von der Kontamination befreit werden. Ein Wiedereintrag von Kontaminationen auf die zu reinigende Feststoffoberfläche kann somit vermieden werden.
- Liegen Anisotropien der Feststoffoberfläche vor, da diese beispielsweise orientiert geschliffen ist, so ist in Schleifrichtung zu reinigen, da eine niedrigere Rauheit vorliegt.
- Fugen sind auf ein Minimum zu reduzieren oder geometrisch bündig zu versiegeln.
- Die Relevanz reduzierter Persistenz von Mikroorganismen auf Oberflächen mit hoher Rauheit und hoher freier Oberflächenenergie ist bei den hier untersuchten Feststoffoberflächen mit ihren Anwendungsgebieten gegenüber der guten Reinigbarkeit als nachrangig zu beurteilen. Die Oberflächeneigenschaften beeinflussen die Überlebensdauer von *S. aureus*, jedoch ist nicht nachgewiesen, ob unter praktischen Bedingungen die zu unterschiedlichen Zeitpunkten vorliegenden Zellzahlen die minimale Infektionsdosis abhängig von den Oberflächeneigenschaften un-

ter- oder überschreiten. Ferner sind Mikroorganismen als partikuläre Kontamination zu betrachten, welche im Reinigungsprozess entfernt oder bei der Desinfektion inaktiviert werden und somit kein Infektionsrisiko mehr darstellen.

- Die Persistenz von Erregern ist primär vom Feststoff und sekundär von den Oberflächeneigenschaften abhängig, sodass für besonders hygienekritische Bereiche oligodynamische Materialien zu präferieren sind. Hierbei ist zu beachten, dass mögliche Oxidschichten die oligodynamische Wirkung stark reduzieren können.

9.2 Offene Probleme und Ausblick

Bei den hier verwendeten Feststoffoberflächen handelt es sich um ungealterte Proben. Unter praktischen Randbedingungen ist zu vermuten, dass Materialien altern. Die Temperaturgeschichte, Diffusionsprozesse, mechanische Einflüsse durch den Gebrauch oder die Exposition von Licht und Feuchtigkeit können die Eigenschaften eines Materials verändern, sodass auch eine veränderte Reinigbarkeit und Überlebensdauer von Erregern resultiert. In zukünftigen Versuchen ist der Einsatz von definiert gealterten Proben sinnvoll, um diesen Einfluss zu untersuchen.

Das Spektrum der Rauheit wurde bei den hier verwendeten Feststoffoberflächen bereits in einem großen Bereich variiert. Das Spektrum der freien Oberflächenenergie könnte in weiteren Versuchen erweitert werden, um das entwickelte Modell für diesen Bereich zu bestätigen. Eine gezielte Beeinflussung der freien Oberflächenenergie kann beispielsweise durch eine Beschichtung wie Diamond Like Carbon (DLC) oder den gezielten Einbau von Elementen erfolgen. So gelang es beispielsweise AUGUSTIN ET AL. [3] durch die Modifikation eines DLC-Netzwerkes mit Fluor die freie Oberflächenenergie von 42 auf 20 mN/m zu reduzieren.

Mit der Verwendung von Kompositmaterialien können durch den Einsatz von Nanomaterialien wie beispielsweise Nanopartikeln Produkteigenschaften wie die Rauheit oder die freie Oberflächenenergie gezielt eingestellt werden [6]. Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Beschichtungen zur Modifikation der Oberflächeneigenschaften ist, dass die Funktion auch bei Abnutzung erhalten bleibt. Bereits heute kommen Kompositmaterialien zum Einsatz wie beispielsweise mit Feststoffpartikeln gefüllte Kunststoffe [138] oder Kompositkeramiken [218]. Eine gezielte Beeinflussung der Reinigbarkeit und der Persistenz von Erregern kann so erreicht werden.

Weiterhin wäre interessant mit Partikelsystemen zu arbeiten, die sich in der freien Oberflächenenergie deutlich von den hier verwendeten mineralischen Fasern und SiO₂-Partikeln unterscheiden. Hierfür kämen beispielsweise Polymerpartikel infrage. Andere Wechselwirkungen zwischen Partikelsystem und Feststoffoberfläche wären die Folge.

Verfahrenstechnisch bleibt zu untersuchen, wie die Kombination verschiedener Parameter die Restkontamination nach der Reinigung beeinflusst. Parameterstudien zur Kombination von mehreren Wischhüben und der Reinigungsgeschwindigkeit oder eine Varia-

tion der Reinigungsrichtung wären sinnvoll zu untersuchen, um letztlich die Hygienesicherheit von Feststoffoberflächen zu optimieren und somit das Übertragungspotential nosokomialer Infektionen zu senken.

10 Literatur

1. Akademischer Verein Hütte (Hrsg) (2012) Das Ingenieurwissen, 34. Aufl. Springer, Berlin
2. Allen T (1981) Powder Technology Series. Particle Size Measurement, 3. Aufl. Springer Science+Business Media
3. Augustin W, Zhang J, Bialuch I, Geddert T, Scholl S (2006) Modifizierte Oberflächenbeschichtungen zur Foulingminderung auf wärmeübertragenden Flächen. *Chemie Ingenieur Technik* 78(5):607–612. doi:10.1002/cite.200500141
4. Augustin W, Fuchs T, Föste H, Schöler M, Majschak J-P, Scholl S (2010) Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing. *Food and Bioproducts Processing* 88(4):384–391
5. Bale MJ, Bennett PM, Beringer JE, Hinton M (1993) The survival of bacteria exposed to desiccation on surfaces associated with farm buildings. *Journal of Applied Microbiology* 75(6):519–528
6. Barth N, Hesselbach J, Schilde C, Kwade A (2014) Optimierung von Easy-to-Clean-Kompositbeschichtungen mithilfe hydrophober Nanopartikel. *Chemie Ingenieur Technik* 86(3):287–294. doi:10.1002/cite.201300110
7. Batel W (1972) Entstaubungstechnik. Grundlagen - Verfahren - Meßwesen. Springer, Berlin
8. Belsey D, Kuh E, Welsch RE (1980) Regression diagnostic. John Wiley & Son Inc., New York
9. Binnig G, Quate CF, Gerber C (1986) Atomic Force Microscope. *Physical Review Letters* 9(9):930–934
10. Bischof C, Possart W (1982) Adhäsion. Theoretische und experimentelle Grundlagen. Akademie-Verlag, Berlin
11. Blé W, Le Gentil-Lelièvre C, Bénézech T, Legrand J, Legentilhomme P (2009) Application of turbulent pulsating flows to the bacterial removal during a cleaning in place procedure. Part 1: Experimental analysis of wall shear stress in a cylindrical pipe. *Journal of Food Engineering* 90(4):422–432
12. Blé W, Legentilhomme P, Bénézech T, Legrand J, Le Gentil-Lelièvre C (2009) Application of turbulent pulsating flows to the bacterial removal during a cleaning in place procedure. Part 2: Effects on cleaning efficiency. *Journal of Food Engineering* 90(4):433–440
13. Blobel V, Lohrmann E (1998) Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse. Teubner, Stuttgart, Leipzig
14. Bobe U (2008) Die Reinigbarkeit technischer Oberflächen im immmergierten System. Dissertation, Technische Universität München
15. Bode K, Hooper RJ, Paterson WR, Wilson DI, Augustin W, Scholl S (2007) Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling Layers. *Heat Transfer Engineering* 28(3):202–209
16. Böge A (2007) Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 18. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden

17. Borho K, Polke R, Wintermantel K, Schubert H, Sommer K Produkteigenschaften und Verfahrenstechnik, Bd 63, S 792–808
18. Box GEP, Cox DR (1964) An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society* 26(2):211–252
19. Boyce JM Environmental contamination makes an important contribution to hospital infection, Bd 65, S 50–54
20. Bradley RS (2009) LXXIX. The cohesive force between solid surfaces and the surface energy of solids. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 13(86):853–862. doi:10.1080/14786449209461990
21. Budelmann H, Dreßler I, Holzhausen J, Sunder W (2016) Leitfaden zur baulichen Hygiene im Operationssaal. *Bauten des Gesundheitswesens (Ernst&Sohn Special)*:57–60
22. Buscalferri F, Lorenzen S, Schmidt M, Schwarm H-M, Anhalt E, Herzog R, Ziegler R (2000) Reinigungsvalidierung. Bestimmung von Sichtbarkeitsgrenzen von pharmazeutischen Feststoffen auf Edelstahloberflächen. *pharmamind* 62(6):411–414
23. Butt H-J, Cappella B, Kappl M Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications. *Surface Science Reports* 59(1-6):1–152. doi:10.1016/j.surfrep.2005.08.003
24. Camline (2017) *Cornerstone Regression: Users Guide*, Petershausen
25. Charlaix E, Crassous J Adhesion forces between wetted solid surfaces, Bd 122, S 184701
26. Clancy C (2013) Creating a Healing Environment. In: Agency for Healthcare Research and Quality (Hrsg) *HERD - Health Environments Research & Design Journal: Understanding the Role of Facility Design in the Acquisition and Prevention of Healthcare-Associated Infections*, S 5–7
27. Concept Heidelberg (Hrsg) (2010) *GMP-/FDS-gerechte Validierung. Qualifizierung von Anlagen und Validierung von Prozessen und Systemen*, 2. Aufl. Editio Cantor Verlag, Aulendorf
28. Cypionka H (Hrsg) (2010) *Grundlagen der Mikrobiologie*, 4. Aufl. Springer, Heidelberg
29. Dammann U-P (2010) Reinigungsvalidierung. In: Concept Heidelberg (Hrsg) *GMP-/FDS-gerechte Validierung. Qualifizierung von Anlagen und Validierung von Prozessen und Systemen*, 2. Aufl. Editio Cantor Verlag, Aulendorf, S 170–178
30. Dancer SJ Hospital cleaning in the 21st century, Bd 30, S 1473–1481
31. Dancer SJ The role of environmental cleaning in the control of hospital-acquired infection, Bd 73, S 378–385
32. Dancer SJ (2004) How do we assess hospital cleaning? A proposal for microbiological standards for surface hygiene in hospitals. *Journal of Hospital Infection* 56(1):10–15
33. Dancer SJ (2014) Controlling Hospital-Acquired Infection: Focus on the Role of the Environment and New Technologies for Decontamination. *Clinical Microbiology Reviews* 27(4):665–690
34. Darcy H (1856) *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Paris

35. Daschner F, Rabbenstein G, Langmaack H (1980) Flächendekontamination zur Verhütung und Bekämpfung von Krankenhausinfektionen. Deutsche Medizinische Wochenschrift 105(10):325–329
36. Delay M (2015) Nanopartikel in aquatischen Systemen. Springer Vieweg, Wiesbaden
37. Derjaguin BV, Muller VM, Toporov YP (1975) Effect of Contact Deformations on the Adhesion of Particles. J Colloid Interface Sci 53(2):314–326
38. DIN EN ISO 14644-9 (2012) Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche - Teil 9: Klassifizierung der partikulären Oberflächenreinheit
39. DIN EN ISO 4287 (2010) Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennung, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
40. Domininghaus H, Elsner P, Eyerer P, Hirth T (2008) Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen, 7. Aufl. Springer VDI, Berlin, Heidelberg
41. Dorris G, Gray D (1980) Adsorption of n-alkanes at zero surface coverage on cellulose paper and wood fibers. J Colloid Interface Sci 77(2):535–362
42. Dreßler I, Honisch, M. Ziegler, L., Budelmann H, Bockmühl DP (2016) Einfluss von Material und Oberflächeneigenschaften auf die Persistenz von *Staphylococcus aureus* auf krankenhausblichen Oberflächen. Hygiene und Medizin 41(9):D131-D138
43. Dreßler, I. Jin, X., Budelmann H, Kasal B (2018) Über den Zusammenhang von Adhäsion und Reinigung von Mikropartikeln auf strukturierten Oberflächen. Chemie Ingenieur Technik 90(3):386–392
44. Dürr H (2007) Influence of Surface Roughness and Wettability of Stainless Steel on Soil Adhesion, Cleanability and Microbial Inactivation. Food and Bioproducts Processing 85(1):49–56. doi:10.1205/fbp06011
45. Dürr H, Wildbrett G (2006) Grundvorgänge bei der Verschmutzung und Reinigung. In: Wildbrett G (Hrsg) Reinigung und Desinfektion in der Lebensmittelindustrie. Behrs Verlag, S 85–128
46. Dzyaloshinskii IE, Lifshitz EM, Pitaevskii LP (1961) General Theory of Van der Waals' Forces. Soviet Physics (Translation) Russ. Vol. 73(3 - 4):381–422
47. Engelhardt J, Knebel W (1993) Konfokale Laserscanning-Mikroskopie. Physik in unserer Zeit 24(2):70–78
48. Erbil HY (2006) Surface Chemistry. Of Solid and Liquid Interfaces. Blackwell Publishing
49. Exner M (2009) Einfluss von metallischen Oberflächenmaterialien auf die mikrobielle Besiedlung sowie der Einfluss von Reinigung und Desinfektion. Universität Bonn, Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit, Bonn
50. Fick A (1855) Über Diffusion. Poggendorfs Annalen der Physik 94:59–86. doi:10.1002/andp.18551700105
51. Franke D, Cole E, Leese K, Foarde K, Berry M (1997) Cleaning for Improved Indoor Air Quality: an Initial Assessment of Effectiveness Indoor Air(7):41–54
52. Fryer PJ, Asteriadou K (2009) A prototype cleaning map. A classification of industrial cleaning processes. Trends in Food Science & Technology 20(6-7):255–262. doi:10.1016/j.tifs.2009.03.005

53. Gail L, Gommel U, Hortig H-P (Hrsg) (2012) Reinraumtechnik, 3. Aufl. Springer, Heidelberg
54. Gastmeier P, Geffers C (2008) Nosokomiale Infektionen in Deutschland: Wie viele gibt es wirklich? Dtsch med Wochenschr 133(21):1111–1115
55. Gastmeier P, Brunkhorst F, Schrappe M, Kern W, Geffers C (2010) Wie viele nosokomiale Infektionen sind vermeidbar? Dtsch med Wochenschr 135(3):91–93
56. Gebhard H (1982) Scherversuche an leicht verdichteten Schüttgütern unter besonderer Berücksichtigung des Verformungsverhaltens. Dissertation, Universität Karlsruhe
57. Gerhards C, Schmid A Assessing the Cleanability of Stainless Steel Surfaces - Development of a Testing Method for Starch and Protein Based Soils. Journal of Hygienic Engineering and Design (3):9–13
58. Gillespie E (2017) Chemical Free Cleaning is Safer for Health. (Posterpräsentation), International Conference on Prevention and Infection Control, Genf
59. Gillespie E, Wilson J, Lovegrove A, Scott C, Abernethy M, Kotsanas D, Stuart RL (2013) Environment cleaning without chemicals in clinical settings. Am J Infect Control 41(5):461–463. doi:10.1016/j.ajic.2012.07.003
60. Gillespie EE, Scott C, Wilson J, Stuart R (2012) Pilot study to measure cleaning effectiveness in health care. Am J Infect Control 40(5):477–478. doi:10.1016/j.ajic.2011.06.010
61. Gillham C, Fryer P, Hasting A, Wilson D (2000) Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows. Journal of Food Engineering 46(3):199–209. doi:10.1016/S0260-8774(00)00083-2
62. Gillham CR, Fryer PJ, Hasting A, Wilson DI (1999) Cleaning-in-Place of Whey Protein Fouling Deposits: Mechanisms Controlling Cleaning. Food and Bioproducts Processing 77(2):127–136
63. Götzinger M (2005) Zur Charakterisierung von Wechselwirkungen partikulärer Feststoffoberflächen. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg
64. Götzinger M, Peukert W Haftkraftverteilungen von rauen Haftsystemen am Beispiel Kugel-Platte, Bd 75, S 1848–1852
65. Graf U, Henning H-J, Stange K, Wilrich P-T (1987) Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik, 3. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg
66. Graham T (1833) On the law of the diffusion of gases. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 2(9):175–190. doi:10.1080/14786443308648004
67. Grass G, Rensing C, Solioz M Metallic copper as an antimicrobial surface, Bd 77, S 1541–1547
68. Grote K-H, Feldhusen J (Hrsg) (2011) Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 24. Aufl. Springer
69. Gwaltney JM, Hendley JO (1982) Transmission of Experimental Rhinovirus Infection by Contaminated Surfaces. American Journal of Epidemiology 116(5):828–833

70. Gyntelberg F, Suadican P, Wohlfahrt Nielsen J, Skov P, Valbjørn E, Nielsen P, Schneider T, Jørgensen O, Wolkoff P, Wilkins CK, Gravesen S, Norn S (1994) Dust and the Sick Building Syndrome. *Indoor Air* (4):223–238
71. Hamaker HC The London—van der Waals attraction between spherical particles, Bd 4, S 1058–1072
72. Hanna H, Umphrey J, Tarrand J, Mendoza M (2001) Management of an Outbreak of Vancomycin-Resistant Enterococci in the Medical Intensive Care Unit of a Cancer Center. *Infection Control & Hospital Epidemiology* 22(4):217–219
73. Hartmüller J, Ripperger S Berechnung der Haftung von Pulverpartikeln an strukturierten Oberflächen, Bd 86, S 1260–1268
74. Hauser G (2008) Hygienische Produktionstechnologie. Wiley-VCH, Weinheim
75. Heim L, Blum J, Preuss M, Butt H-J (1999) Adhesion and Friction Forces between Spherical Micrometer-Sized Particles. *Phys. Rev. Lett.* 83(16):3328–3331. doi:10.1103/PhysRevLett.83.3328
76. Hertz H (1881) Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92:156–171
77. Hiemenz PC, Rajagopalan R (1997) Principles of Colloid and Surface Chemistry, 3. Aufl. Marcel Dekker, New York
78. Hoffmann W, Reuter H (1984) Zirkulationsreinigen (CIP) von geraden Rohren in Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit und anderen Einflußfaktoren. *Chemie Ingenieur Technik* 56(4):328–329
79. Hoffmann B, Kubier B, Husemann K (2003) Haftkraftmessungen an modifizierten Oberflächen. *Chemie Ingenieur Technik* 75(6):742–749
80. Hofmann J (2007) Stoffübergang bei der Reinigung als Qualifizierungsmethode der Reinigbarkeit. Dissertation, Technische Universität München
81. Huang Y, Guo D, Lu X, Luo J (2011) Modeling of particle removal processes in brush scrubber cleaning. *Wear* 273(1):105–110. doi:10.1016/j.wear.2011.06.022
82. Huber MT (1904) Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper. *Annalen der Physik* 319(6):153–163
83. Hutter JL, Bechhoefer J (1993) Calibration of atomic-force microscope tips. *Review of Scientific Instruments* 64(1868):1868–1873
84. Israelachvili J (1991) Intermolecular & Surface Forces, 2. Aufl. Elsevier, London
85. Jenike AW (1964) Storage and Flow of Solids. Bulletin of the University of Utah Expl. Station Report Nr. 123
86. Jin X, Kasal B (2016) AFM Adhesion Force Mapping on Wood: Influence of Surface Roughness and Tip Geometry. *Royal Society Open Science* (accepted)
87. Johnson KL, Greenwood JA (1997) An Adhesion Map for the Contact of Elastic Spheres. *J Colloid Interface Sci* 192(2):326–333. doi:10.1006/jcis.1997.4984
88. Johnson KL, Kendall K, Roberts AD (1971) Surface Energy and the Contact of Elastic Solids. *Proceedings of the Royal Society of London. Mathematical und Physical Sciences* 324(1558):301–313

89. Jones R, Pollock HM, Cleaver JAS, Hodges CS Adhesion Forces between Glass and Silicon Surfaces in Air Studied by AFM. Effects of Relative Humidity, Particle Size, Roughness, and Surface Treatment, Bd 18, S 8045–8055
90. Kampf G Flächendesinfektion, Bd 08, S 273–288
91. Kampf G, Kramer A (2004) Epidemiologic Background of Hand Hygiene and Evaluation of the Most Important Agents for Scrubs and Rubs. *Clinical Microbiology Reviews* 17(4):863–893
92. Katainen J, Paaianen M, Ahtola E, Pore V, Lahtinen J (2006) Adhesion as an interplay between particle size and surface roughness. *J Colloid Interface Sci* 304(2):524–529. doi:10.1016/j.jcis.2006.09.015
93. Keller M, Kreck G, Waldner A, Baum G (2013) Je glatter desto sauberer? Wie gut lassen sich Werkstoffoberflächen reinigen? Korreliert die Reinigbarkeit glatter Materialoberflächen mit deren Oberflächenrauheit? *TechnoPharm* 3(1):6–12
94. Kendall K (Hrsg) (2004) *Molecular Adhesion and Its Applications. The Sticky Universe.* Kluwer Academic Publishers, Boston, MA
95. Kendall K, Kamerow D (2013) Understanding the Role of Facility Design in the Acquisition and Prevention of Healthcare-Associated Infections. In: Agency for Healthcare Research and Quality (Hrsg) *HERD - Health Environments Research & Design Journal: Understanding the Role of Facility Design in the Acquisition and Prevention of Healthcare-Associated Infections*, S 13–17
96. Kenters N, Huijskens E, Wit S de, Sanders I, van Rosmalen J, Kuijpers E, Voss A (2017) Effectiveness of Various Cleaning and Disinfectant Products on *Clostridium Difficile* Spores of PCR Ribotypes 010, 014 and 027, *International Conference on Prevention and Infection Control*, Genf
97. Keyence Deutschland GmbH (2015) *Einführung zur Rauheitsmessung von Oberflächen*
98. Kildesø J, Tornvig L, Skov P, Schneider T (1998) An Intervention Study of the Effect of Improved Cleaning Methods on the Concentration and Composition of Dust. *Indoor Air* 8(1):12–22. doi:10.1111/j.1600-0668.1998.t01-3-00003.x
99. Klumpp B (1993) *Prüfverfahren zur Untersuchung der Partikelreinheit technischer Oberflächen.* Dissertation, Universität Stuttgart
100. Knoll KH (2000) *Hygiene in Gesundheitseinrichtungen. Planung - Anlage - Bau - Ausstattung - Betrieb.* Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart
101. Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention beim Robert Koch-Institut Anforderungen an die Hygiene bei der Reinigung und Desinfektion von Flächen. Empfehlung der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention beim Robert Koch-Institut (RKI), Bd 47, S 51–61
102. Kramer A, Schwebke I, Kampf G How long do nosocomial pathogens persist on inanimate surfaces? A systematic review, Bd 6, S 130
103. Krupp H, Sperling G (1966) Theory of Adhesion of Small Particles. *Journal of Applied Physics* 37(11):4176–4180

104. Kulicke W-M (Hrsg) (1986) Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen. Polymerlösungen, Polymerschmelzen, Schüttgüter, Eichstandards, Flüssigkristalle, Synovia, Tenside, Blut, Newtonsche Flüssigkeiten. Hüthig und Wepf, Basel
105. Labuda W (2000) HiTech-Reinigungstücher. Präzisionswerkzeuge einer modernen Fertigungskultur. ReinRaumTechnik (1):63–68
106. Labuda W (2017) Reinraum-Verbrauchsmaterial. Aspekte, Simulation, Argumente. ReinRaumTechnik 19(Sonderausgabe):5–39
107. Lauth GJ, Kowalczyk J (2016) Einführung in die Physik und Chemie der Grenzflächen und Kolloide. Springer Spektrum, Berlin
108. Leclercq-Perlat M-N, Lalande M (1994) Cleanability in relation to surface chemical composition and surface finishing of some materials commonly used in food industries. Journal of Food Engineering 23(4):501–517. doi:10.1016/0260-8774(94)90108-2
109. Leite FL, Bueno CC, Da Róz AL, Ziemath EC, Oliveira Jr. ON (2012) Theoretical Models for Surface Forces and Adhesion and their Measurement Using Atomic Force Microscopy. International Journal of Molecular Sciences 13:12773–12856
110. Lenfestey N, Denham M, Kendall K, Kamerow D (2013) Expert Opinions on the Role of Facility Design in the Acquisition and Prevention of Healthcare-Associated Infections. In: Agency for Healthcare Research and Quality (Hrsg) HERD - Health Environments Research & Design Journal: Understanding the Role of Facility Design in the Acquisition and Prevention of Healthcare-Associated Infections, S 31–45
111. Leschonski K (1978) Die On-Line-Messung von Partikelgrößenverteilungen in Gasen und Flüssigkeiten. Chemie Ingenieur Technik 50(3):194–203
112. Lighthouse Worldwide Solutions (o. J.) Solair Portable. Airborne Particle Counters (Produktdatenblatt)
113. List W, Müller J (2005) Reinigungsvalidierung unter besonderer Berücksichtigung von Proteinrückständen. In: Concept Heidelberg (Hrsg) GMP-/FDA-Compliance in der Biotechnologie. Editio Cantor Verlag, S 81–93
114. Löffler-Mang M (2012) Optische Sensorik. Lasertechnik, Experimente, Light Barriers. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
115. Lyklema J (1999) Elektrische Doppelschichten: Elektrostatik und Elektrodynamik. Chemie Ingenieur Technik 71(12):1364–1369
116. Lytsy B (2017) Hospital Wide Reduction of Clostridium Difficile after a Cleaning Intervention in Three Wards, International Conference on Prevention and Infection Control, Genf
117. Määttä J (2007) Modifications of surface materials and their effects on cleanability as studied by radiochemical methods. Dissertation, University of Helsinki
118. Määttä J, Koponen H-K, Kuisma R, Kymäläinen H-R, Pesonen-Leinonen E, Uusi-Rauva A, Hurme K-R, Sjöberg A-M, Suvanto M, Pakkanen TA (2007) Effect of plasticizer and surface topography on the cleanability of plasticized PVC materials. Applied Surface Science 253(11):5003–5010. doi:10.1016/j.apsusc.2006.11.017

119. Määttä J, Hellstedt M, Kuisma R, Kymäläinen HR, Mahlberg R, Sjöberg A-M (2009) Effects of chemical and mechanical wearing on the cleanability and surface properties of traditional and new surface materials in cattle barns – a laboratory study. *Biosystems Engineering* 103(4):464–473. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.02.003
120. Marone C (1998) Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 26(1):643–696. doi:10.1146/annurev.earth.26.1.643
121. Matsumara R, Ochi J, Yamamoto M, Hirata Y (2017) Influence of Formulation and Wipe Materials on Efficacy of Quaternary Ammonium Compounds (QAC) - Containing Wet Wipe Products, International Conference on Prevention and Infection Control, Genf
122. Mauermann M (2012) Methode zur Analyse von Reinigungsprozessen in nicht immmergierten Systemen der Lebensmittelindustrie. Dissertation, Technische Universität Dresden
123. Mauermann M, Bellmann C, Calvimontes A, Caspari A, Bley T, Majschak J-P Reinigbarkeit von Oberflächen in der Lebensmittelindustrie durch Flüssigkeitsstrahlen, Bd 84, S 1568–1574
124. Maugis D (1992) Adhesion of Spheres: the JKR-DMT transition using a Dugdale model. *J Colloid Interface Sci* (150):243–269
125. Meschede D (Hrsg) (2010) Gerthsen Physik, 24. Aufl, Bonn
126. Mettler E, Carpentier B (1999) Hygienic Quality of Floors in Relation to Surface Texture. *Food and Bioproducts Processing* 77(2):90–96
127. Mielke M, Ruscher C (2014) Empfehlung zur Prävention und Kontrolle von Methicillin-resistenten Staphylococcus aureus-Stämmen (MRSA) in medizinischen und pflegerischen Einrichtungen
128. Mittal K (Hrsg) (1986) Particles on Surfaces 1: Detection, Adhesion and Removal. Plenum Press, New York
129. Montag D (2012) Untersuchung des Einflusses von Oberflächeneigenschaften verschiedener Kunststoffe auf die Besiedlung durch die Umsatzleistung von PSEUDOMONAS PUTIDA MT2. Dissertation, Technische Universität München
130. Moser S (1976) Van der Waals- und elektrostatische Haftkräfte. Dissertation, Universität Karlsruhe
131. Mulugeta E (2010) Niederdruckstrahlwäsche von Gemüse. Zusammenhänge zwischen Strahlparametern und Abtrags- bzw. Reinigungswirkung. Dissertation, Universität Rostock
132. Neely A A survey of Gram-Negative Bacteria Survival on Hospital Fabrics and Plastics *Journal of Burn Care & Rehabilitation*, Vol. 21, Number 6, S 523–527
133. Neely A, Maley MP (2000) Survival of Enterococci and Staphylococci on Hospital Fabrics and Plastic. *Journal of Clinical Microbiology* 38(2):724–726
134. Noyce JO, Michels H, Keevil CW (2006) Potential use of copper surfaces to reduce survival of epidemic methicillin-resistant Staphylococcus aureus in the healthcare environment. *Journal of Hospital Infection* 63:289–297

135. Otte A (2012) Anforderungen an die moderne Krankenhaus- und Altenheimreinigung. *aseptica* 18(2):3–5
136. Otter JA, Yezli S, French GL The role played by contaminated surfaces in the transmission of nosocomial pathogens, *Bd 32*, S 687–699
137. Palzer S, Hiebl C, Sommer K, Lechner H (2001) Einfluss der Rauigkeit einer Feststoffoberfläche auf den Kontaktwinkel. *Chemie Ingenieur Technik* 73(8):1032–1038. doi:10.1002/1522-2640(200108)73:8<1032::AID-CITE1032>3.3.CO;2-B
138. Patnaik A, Satapathy A, Chand N, Barkoula NM, Biswas S (2010) Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites. A review. *Wear* 268(1-2):249–263. doi:10.1016/j.wear.2009.07.021
139. Pérez, JL, Gómez E, Sauca G (1990) Survival of gonococci from urethral discharge on fomites. *European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases* 9(1):54–55
140. Pesonen-Leinonen E (2005) Determination of Cleanability of Plastic Surfaces. Dissertation, University of Helsinki
141. Pietsch W, Rumpf H (1967) Haftkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen und Grenzwinkel einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln. *Chemie Ingenieur Technik* 39(15):885–936
142. PMT Messtechnik (o. J.) PartSens. Tragbares Messsystem zur Partikelmessung auf Oberflächen (Produktdatenblatt)
143. Podczec F, Newton JM, James, MB (1995) Adhesion and friction between powders and polymer or aluminium surfaces determined by a centrifuge technique. *Powder Technology* 83(3):201–209
144. Pöhlmann K, Zum Gahr K-H (2000) AFM-Untersuchungen zu adhäsiven Wechselwirkungen an einkristallinem Si und voroxidiertem SiC in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 31(4):280–289. doi:10.1002/(SICI)1521-4052(200004)31:4<280::AID-MAWE280>3.3.CO;2-Z
145. Popov VL, Heß M (2013) Methode der Dimensionsreduktion in Kontaktmechanik und Reibung. Springer, Berlin, Heidelberg
146. Powles JG (1985) On the validity of the Kelvin equation. *Journal of Physics a: Mathematical and General* 18(9):1551–1553
147. Quirk M, Serda J (2001) *Semiconductor Manufacturing Technology. Etch*. Prentice Hall
148. Quirynen M, Bollen CML (1995) The influence of surface roughness and surface-free energy on supra- and subgingival plaque formation in man. A review of literature. *Journal of Clinical Periodontology* 22(1):1–14
149. Rabinovich YI, Adler JJ, Ata A, Singh RK, Moudgil BM (2000) Adhesion between Nanoscale Rough Surfaces. I. Role of Asperity Geometry. *J Colloid Interface Sci* 232:10–16
150. Rabinovich YI, Adler JJ, Ata A, Singh RK, Moudgil BM (2000) Adhesion between Nanoscale Rough Surfaces. II. Measurement and Comparison with Theory. *J Colloid Interface Sci* 232:17–24

151. Reiners G, Beck U, Peukert W, Sommer K, Bobe U Nanotechnologische Entwicklung von „easier-to-clean“-Oberflächenstrukturen für eine zukünftig gesteigerte Lebensmittel- und Produktsicherheit
152. Reiners U, Beck U, Sommer K, Bobe U (2005) AiF 13586 N II: Optimierung von Reinigungsverfahren in der Lebensmittelindustrie bei Oberflächen mit makroskopischen und mikroskopischen Fehlstellen (Schweißnähte, Risse, Poren) in Verbindung mit der Auswahl und dem Verbrauch von lebensmittelgerechten Reinigungsmitteln und Tensiden
153. Reuter H (1983) Reinigen und Desinfizieren im Molkereibetrieb. Stand des Wissens und der Technik. Chemie Ingenieur Technik 55(4):293–301
154. Rintala H, Pitkäranta M, Toivola M, Paulin L, Nevalainen A (2008) Diversity and seasonal dynamics of bacterial community in indoor environment. BMC Microbiol. 56(8)
155. Robert Koch Institut (2011) Deutsche Nationale Punkt-Prävalenzstudie zu nosokomialen Infektionen und Antibiotika-Anwendung
156. Robert Koch Institut, Statistisches Bundesamt (2000) Nosokomiale Infektionen - Gesundheitsberichterstattung des Bundes. Heft 8
157. Rumpf H (1958) Grundlagen und Methoden des Granulierens. Chemie Ingenieur Technik 30(3):144–158
158. Rumpf H (1974) Die Wissenschaft des Agglomerierens. Chemie Ingenieur Technik 46(1):1–11
159. Rumpf H, Sommer K, Steier K (1976) Mechanismen der Haftkraftverstärkung bei der Partikelhaftung durch plastisches Verformen, Sintern und viskoelastisches Fließen. Chemie Ingenieur Technik 48(4):300–307
160. Rutala WA, Gergen MF, Weber DJ (2012) Efficacy of different cleaning and disinfection methods against *Clostridium difficile* spores: importance of physical removal versus sporicidal inactivation. Infect Control Hosp Epidemiol 33(12):1255–1258. doi:10.1086/668434
161. Saikhwan P, Geddert T, Augustin W, Scholl S, Wilson DI (2006) Effect of Surface Treatment on Cleaning of a Model Food Soil. Surface and Coatings Technology (201)
162. Sanders HL, Lambert JM (1950) An approach to a more realistic cotton detergent test. Journal of the American Oil Chemists Society 27(5):153–159. doi:10.1007/BF02634409
163. Sattar SA, Jacobsen H, Springthorpe VS, Cusack TM, Rubino JR (1993) Chemical disinfection to interrupt transfer of rhinovirus type 14 from environmental surfaces to hands. Applied and Environmental Microbiology 59(5):1579–1585
164. Schlögl T, Schärff T (2016) Bestimmung der Partikelbelastung von Oberflächen und Equipment in der aseptischen Abfüllung. pharmamind 78(4):593–600
165. Schlüßler H-J (1970) Zur Reinigung fester Oberflächen in der Lebensmittelindustrie. Milchwissenschaft 25(3):133–145
166. Schmauz G (2010) Verfahren zur Klassifizierung von Partikeln in der Automobilindustrie mittels Lumineszenzspektroskopie, Universität Stuttgart

167. Schmauz G, Grimme R (2005) Online-Qualitätsüberwachung mit Streiflicht. *Journal für Oberflächentechnik* (3):70–74
168. Schöler M (2011) Analyse von Reinigungsvorgängen an komplexen Geometrien im immersierten System. Dissertation, Technische Universität Dresden
169. Schubert H (1979) Grundlagen des Agglomerierens. *Chemie Ingenieur Technik* 51(4):266–277
170. Schultz J, Lavielle L, Martin C (1987) Role of the interface on carbon fibre/epoxy composites. *Journal of Adhesion* (23):45–60
171. Schulze D (2009) *Pulver und Schüttgüter*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
172. Schulze-Röbbecke R (2013) Isolierung von MRSA-Patienten. *Krankenhaushygiene up2date* 2(8):81–82. doi:10.1055/s-0033-1344361
173. Schuster A, Dettenkofer M *Oberflächen im Krankenhaus: Reinigung und Desinfektion*, Bd 2, S 233–248
174. Scott E, Bloomfield S (1990) The survival and transfer of microbial contamination via cloths, hands and utensils. *Journal of Applied Bacteriology* 68:271–278
175. Scott JM, Barnes, R. N., Dunsmore, DG (1981) Apparatus and Techniques for Measuring the Physical Cleaning Performance of Spray Nozzles. *Transactions of the ASAE*:524–525
176. Seifert B (1998) Die Untersuchung von Hausstaub im Hinblick auf Expositionsabschätzungen. *Bundesgesundhbl.* 41(9):383–391. doi:10.1007/BF03044335
177. Semleit D (1997) Konzeption und Realisierung eines In-situ- und On-line-Meßverfahrens zur Partikeldetektion auf transparenten Oberflächen. Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg
178. Shi B, Wang Y, Jia L (2011) Comparison of Dorris-Gray and Schultz methods for the calculation of surface dispersive free energy by inverse gas chromatography. *J Chromatogr A* 1218(6):860–862. doi:10.1016/j.chroma.2010.12.050
179. Sinner H (1960) *Über das Waschen mit Haushaltwaschmaschinen*, 2. Aufl. Haus+Heim Verlag
180. Sqube (2007) *Surface-Science-Support*. www.sqube.de
181. St. John DF, Montgomery DJ *Adhesion of Small Metal Spheres to Plane Metal Substrates*, Bd 42, S 663
182. Statistisches Bundesamt (2016) *Gesundheit - Grunddaten der Krankenhäuser*. Fachserie 12 Reihe 6.1.1, Wiesbaden
183. Steinberg J, Denham M, Zimring C, Kasali A, Kendall K, Jacob J (2013) The Role of the Hospital Environment in the Prevention of Healthcare-Associated Infections by Contact Transmission. In: Agency for Healthcare Research and Quality (Hrsg) *HERD - Health Environments Research & Design Journal: Understanding the Role of Facility Design in the Acquisition and Prevention of Healthcare-Associated Infections*, S 46–73
184. Steininger J, Kuiper S, Ito S, Schitter G (2012) Schnelle Rasterkraftmikroskopie durch moderne Regelungstechnik und mechatronische Systemintegration. *Elektrotechnik und Informationstechnik* 129(1):28–33

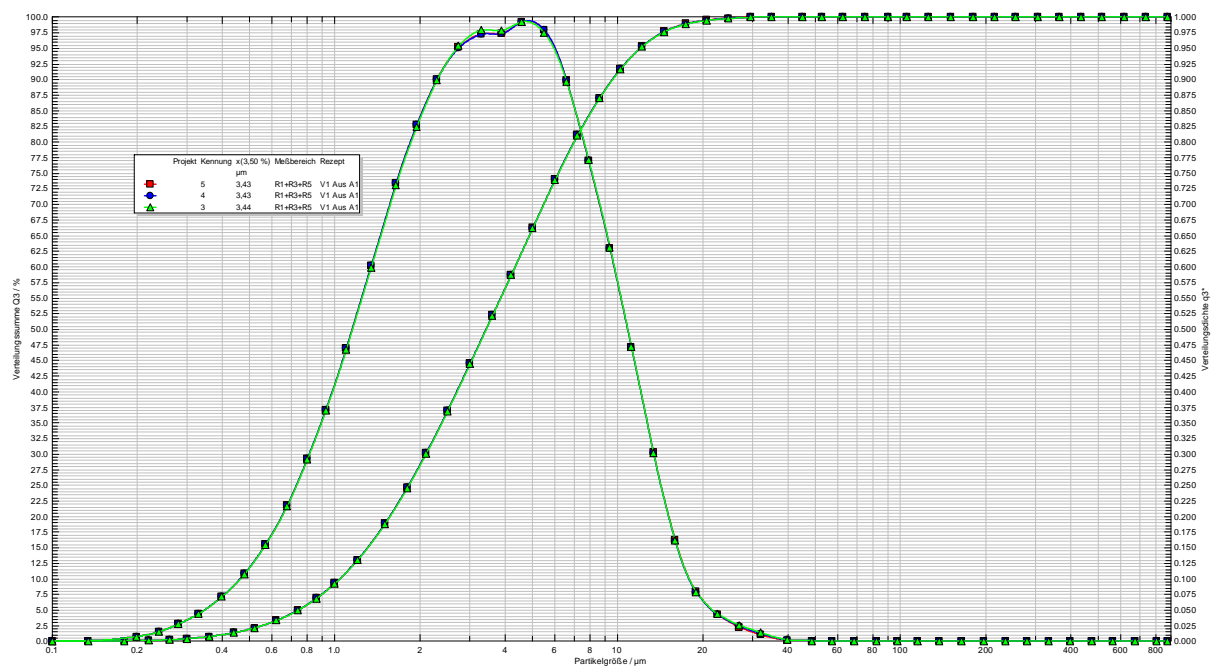
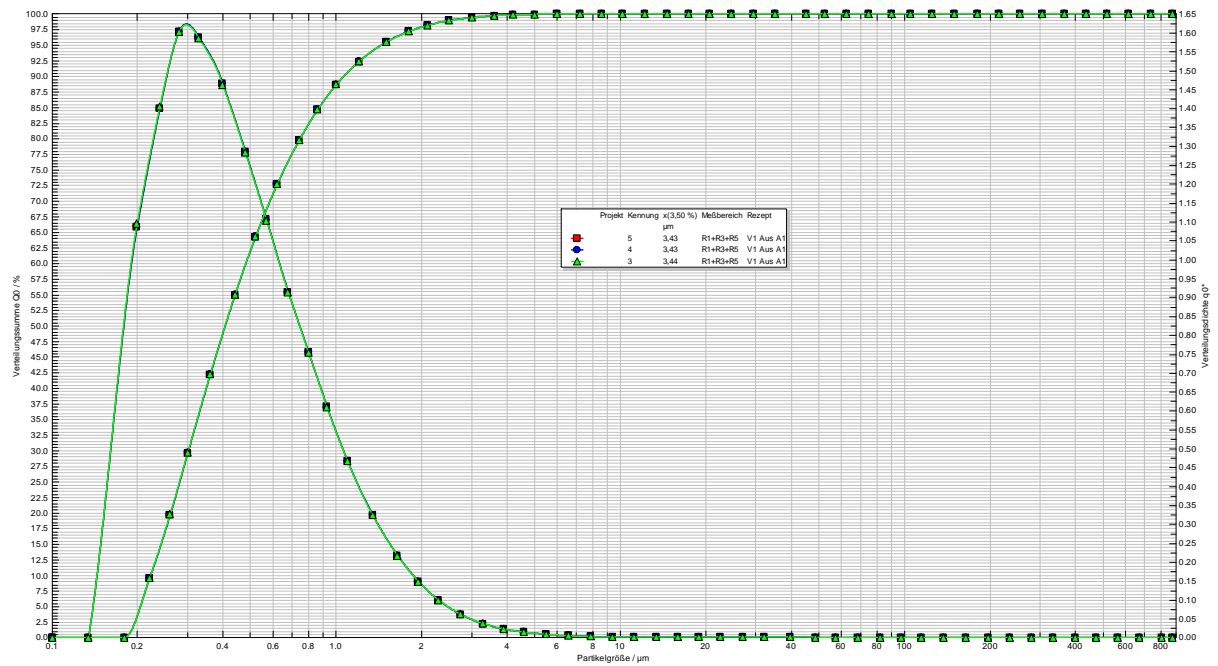
185. Stier W (2001) Methoden der Zeitreihenanalyse. Springer, Berlin, Heidelberg
186. Stieß M (2009) Mechanische Verfahrenstechnik. Partikeltechnologie 1, 3. Aufl. Springer Verlag, Heidelberg
187. Stiller A, Schröder C, Gropmann A, Schwab F, Behnke M, Geffers C, Holzhausen J, Sunder W, Gastmeier P (2016) Ausstattung mit Händedesinfektionsmittelspendern und Einbettzimmern in Hinblick auf die Infektionsprävention - eine Bestandsaufnahme in Krankenhäusern in Deutschland. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz 59(8):986–991. doi:10.1007/s00103-016-2384-x
188. Stiller A, Schröder C, Gropmann A, Schwab F, Behnke M, Geffers C, Sunder W, Holzhausen J, Gastmeier P (2017) ICU ward design and nosocomial infection rates: a cross-sectional study in Germany. J. Hosp. Infect. 95(1):71–75. doi:10.1016/j.jhin.2016.10.011
189. Stoehr B, Hall C, Evans D, Murphy P (2016) Cleaning Dirty Surfaces: A Three-Body Problem. ACS Appl Mater Interfaces 8(28):18534–18539. doi:10.1021/acsami.6b04181
190. Sunder W, Holzhausen J, Gastmeier P, Dreßler I, Budelmann H (Hrsg) (2018 (im Druck)) Leitfaden für bauliche Hygiene in Krankenhäusern
191. Surface Measurement Systems (2010) iGC Surface Energy Analyzer
192. Sympatec GmbH (Hrsg) (1990) Die Anwendung der Laserbeugung zur Partikelgrößenanalyse. ausführliche deutsche Fassung des Posterbeitrages "The Application of Laser Diffraction Technology"
193. Sympatec GmbH System-Partikel-Technik (o. J.) HELOS. Partikelgrößenanalyse mit Laserbeugung (Technische Daten). <http://www.sympatec.com/DE/LaserDiffraction/HELOS1.html>. Zugriffen: 26. Oktober 2016
194. Tabor D (1977) Surface forces and surface Interactions. J Colloid Interface Sci 58(1):2–13
195. Thomson W (1871) LX. On the Equilibrium of Vapour at a Curved Surface of Liquid. Philosophical Magazine (and Journal of Science) 4(42):448–452
196. Thor W, Loncin M (1978) Reinigen, Desinfizieren und Nachspülen in der Lebensmittel-Industrie. Chemie Ingenieur Technik 50(3):188–193. doi:10.1002/cite.330500306
197. Tomas J, Kleinschmidt S Improvement of Flowability of Fine Cohesive Powders by Flow Additives, Bd 32, S 1470–1483
198. Trofimowa TJ (1997) Physik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
199. van Oss CJ, Good RJ, Chaudhury MK (1988) Additive and Nonadditive Surface Tension Components and the Interpretation of Contact Angles. Langmuir (4):884–891
200. van Oss CJ, Chaudhury MK, Good RJ (1988) Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems. Chem. Rev. 88:927–941
201. Verheyen C, Dhert WJA, Blicke-Hogervorst J de, van der Reijden T, Petit P, Groot K de (1993) Adherence to a metal, polymer and composite by Staphylococcus aureus and Staphylococcus epidermis. Biomaterials 14(5):383–391

202. Visser J (1972) On Hamaker Constants: A Comparison Between Hamaker Constants and Lifhsitz-van der Waals Constants. *Advances in Colloid and Interface Science* 3:331–363
203. Vitos L, Ruban AV, Skriver HL, Kollár J (1998) The surface energy of metals. *Surface Science* 411(1-2):186–202. doi:10.1016/S0039-6028(98)00363-X
204. Vorstand der Deutschen Gesellschaft für Krankenhaushygiene e. V. Reinigung in Krankenhäusern - eine Umfrage der DGKH im Jahr 2013 HygMed
205. Wagenvoort JHT, Sluijsmans W, Penders RJR (2000) Better environmental survival of outbreak vs. sporadic MRSA isolates. *Journal of Hospital Infection* 45:231–234
206. Wang H-C (1990) Effects of Inceptive Motion on Particle Detachment from Surfaces. *Aerosol Science and Technology* 13(3):386–393. doi:10.1080/02786829008959453
207. Webster C, Towner KJ, Humphreys H (2000) Survival of *Acinetobacter* on Three Clinically Related Inanimate Surfaces. *Infect Control Hosp Epidemiol* 21:246
208. Weigl B (2004) Trennkräfte zwischen Mikroorganismen, Partikeln und Oberflächen. Dissertation, Technische Universität München
209. Welchner K (1993) Zum Ausspülverhalten hochviskoser Produkte aus Rohrleitungen - Wechselwirkungen zwischen Produkt und Spülfluid. Dissertation, Technische Universität München
210. Wember T (2016) Design of Experiment. Systematic and efficient development of products and processes and empirical model building based on statistical principles. camline, Olfen
211. Wendt C, Dietze B, Dietz E, Rüden H Survival of *Acinetobacter baumannii* on Dry Surfaces *Journal of Clinical Microbiology*, Vol. 35, No. 6, S 1394
212. Wesselingh JA, Krishna R (2000) Mass transfer in multicomponent mixtures, 1. Aufl. Delft University Press, Delft
213. Whiteley GS, Gosbell I, Vickery K, Jensen S, Knight J (2017) Biofilms in Healthcare Settings and the MRO Transmission Risk. (Posterpräsentation), International Conference on Prevention and Infection Control, Genf
214. Wildbrett G (Hrsg) (2006) Reinigung und Desinfektion in der Lebensmittelindustrie. Behrs Verlag
215. Williams AP, Avery LM, Killham K, Jones DL (2005) Persistence of *Escherichia coli* O157 on farm surfaces under different environmental conditions. *Journal of Applied Microbiology* 98(5):1075–1083
216. Wilm H, Schwedes J (1986) Schüttgüter. In: Kulicke W-M (Hrsg) Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen. Polymerlösungen, Polymerschmelzen, Schüttgüter, Eichstandards, Flüssigkristalle, Synovia, Tenside, Blut, Newtonsche Flüssigkeiten. Hüthig und Wepf, Basel, S 435–480
217. Xin H, Chen XD, Ozkan N (2002) Whey Protein-Based Gel as a Model Material for Studying Initial Cleaning Mechanisms of Milk Fouling. *J Food Science* 67(7):2702–2711. doi:10.1111/j.1365-2621.2002.tb08802.x

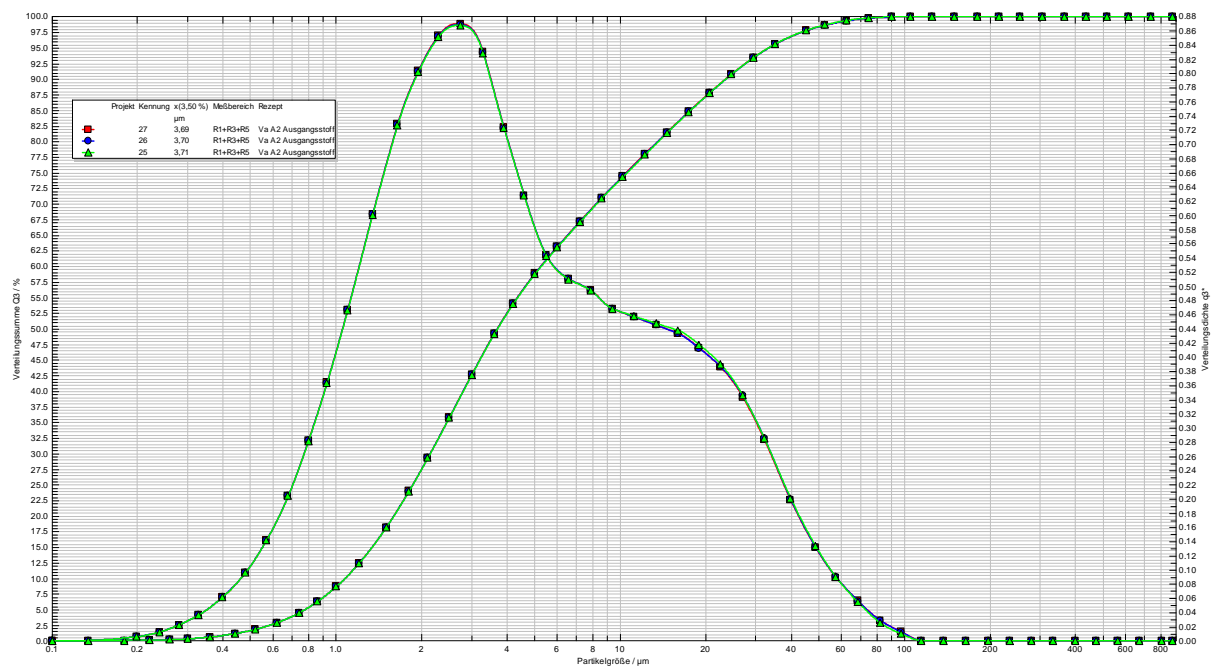
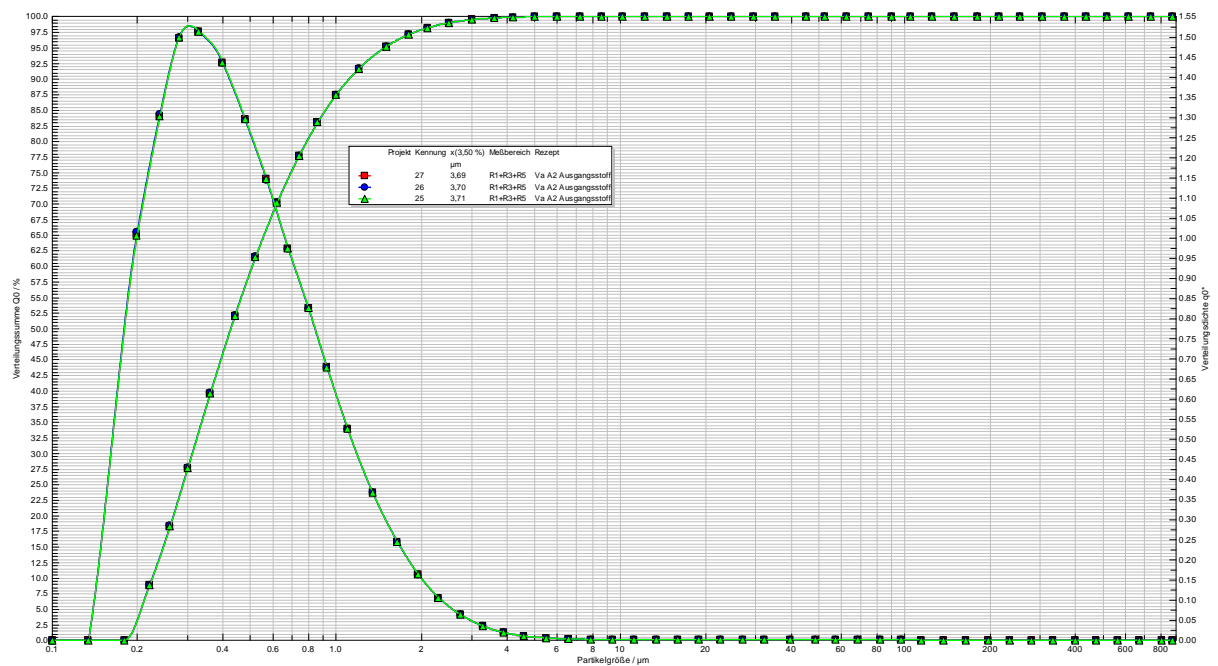
- 218. Zapata-Solvas E, Gómez-García D, Domínguez-Rodríguez A (2012) Towards physical properties tailoring of carbon nanotubes-reinforced ceramic matrix composites. *Journal of the European Ceramic Society* 32(12):3001–3020. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2012.04.018
- 219. Zimon AD (1982) *Adhesion of Dust and Powder*, 2. Aufl. Springer, New York
- 220. Zimring C, Jacob J, Denham M, Kamerow D, Hall K, Cowan D, Kasali A, Lenfestey N, Do E, Steinberg J (2013) The Role of Facility Design in Preventing the Transmission of Healthcare-Associated Infections: Background and Conceptual Framework. In: Agency for Healthcare Research and Quality (Hrsg) *HERD - Health Environments Research & Design Journal: Understanding the Role of Facility Design in the Acquisition and Prevention of Healthcare-Associated Infections*, S 18–30

Anhang A: Partikelgrößenverteilung der Modellkontamination

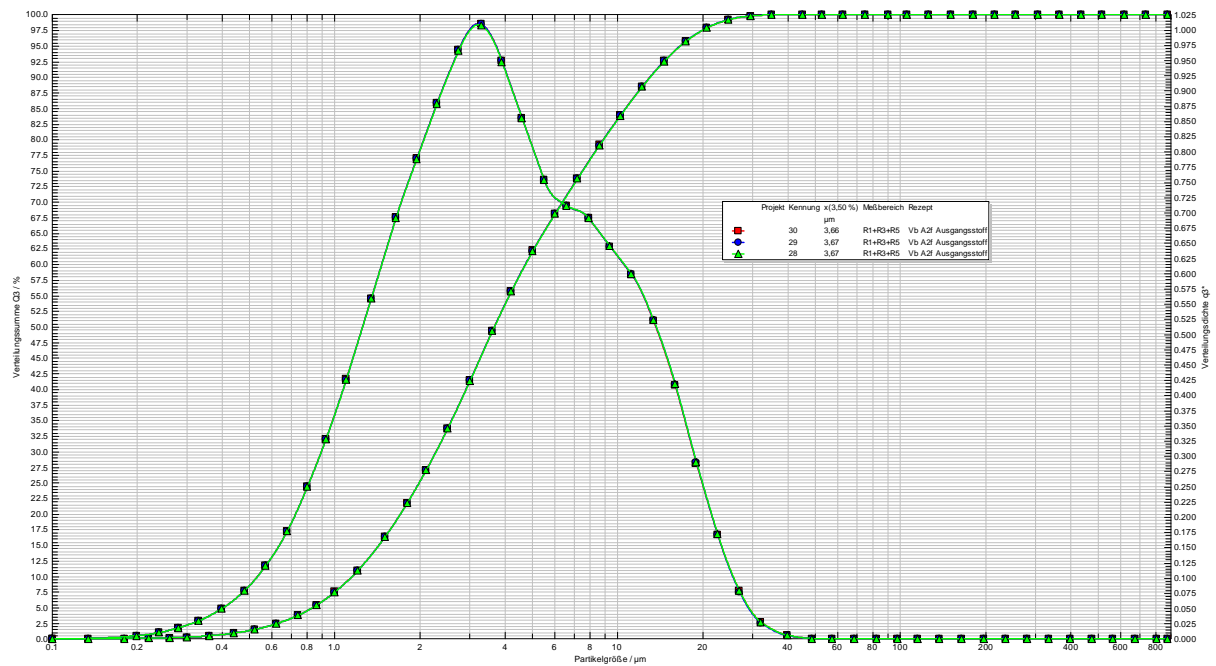
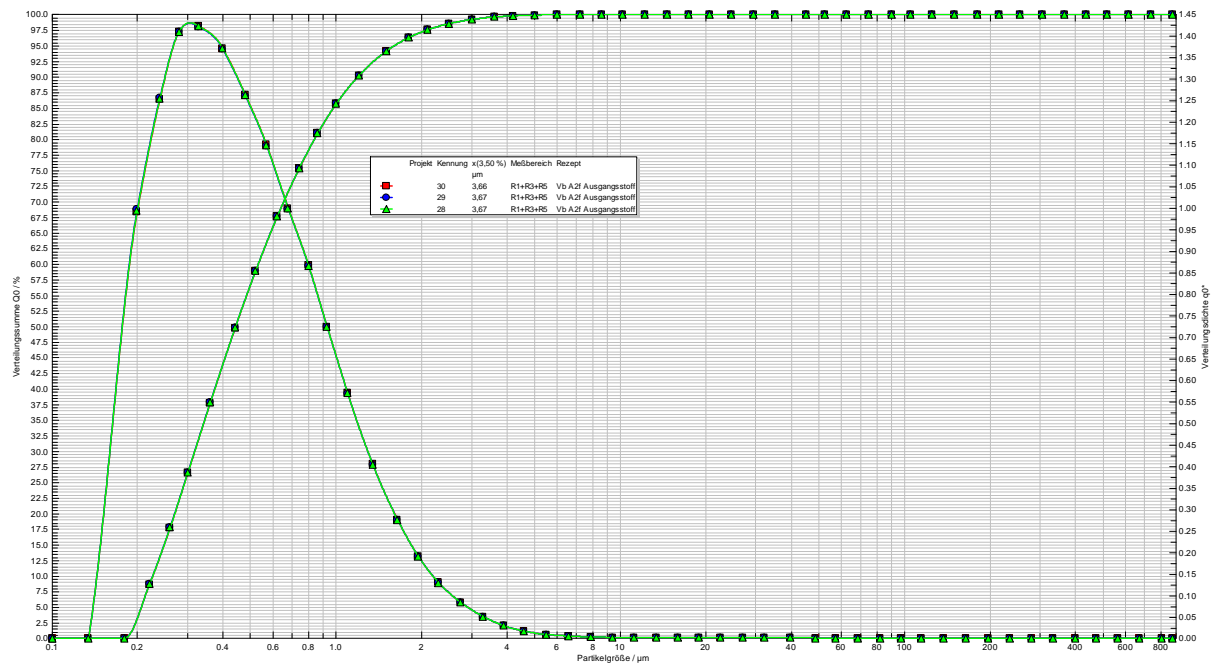
Kontamination A1



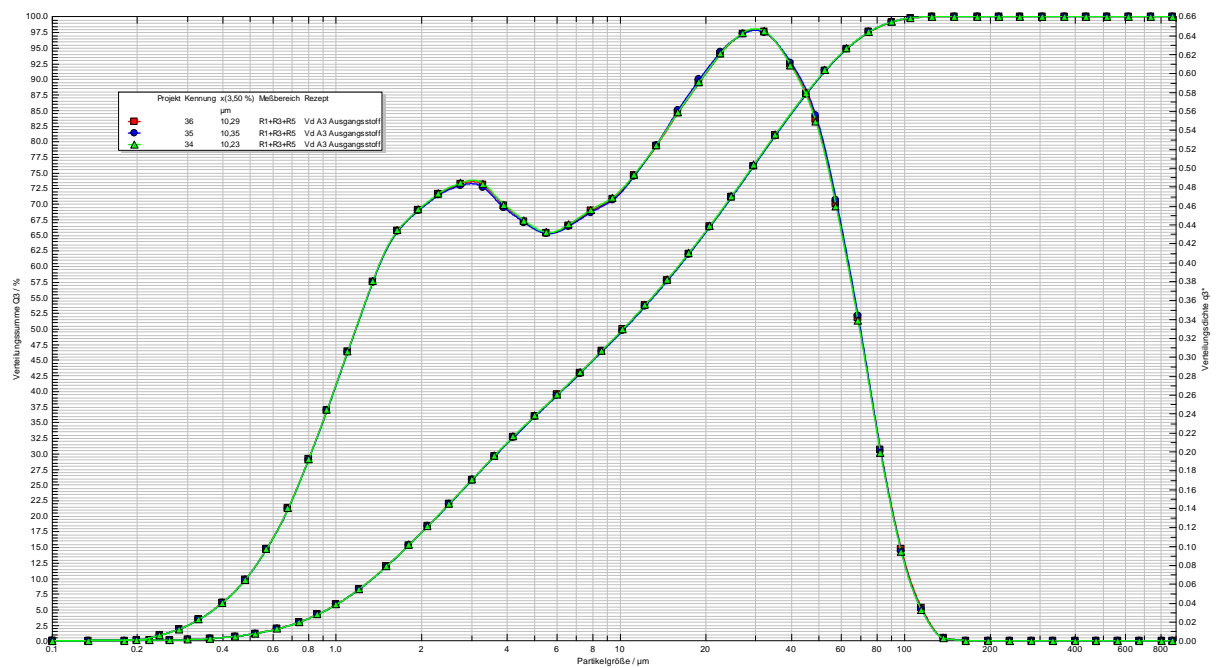
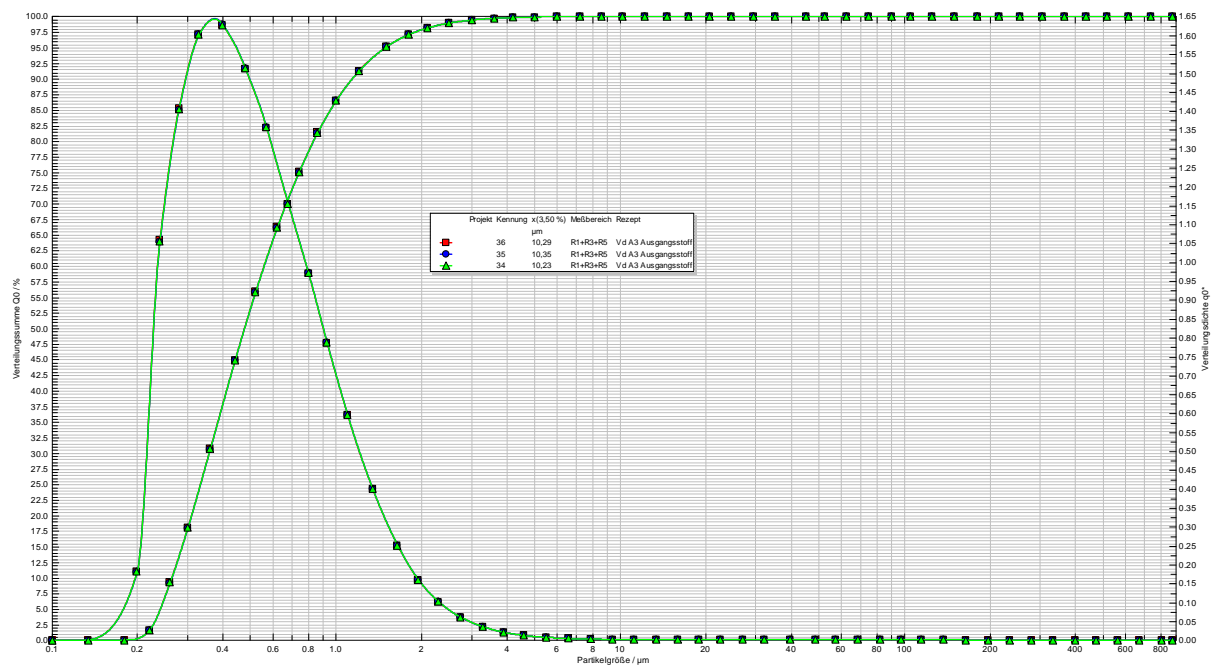
Kontamination A2



Kontamination A2_fein



Kontamination A3



Anhang B: Adhäsionskraftmessung

Tabelle: Gemessene Rauheit und Adhäsionskraft zwischen einer sphärischen SiO₂-Spitze ($d=6,62\ \mu\text{m}$) und verschiedenen Feststoffoberflächen ($n=64$)

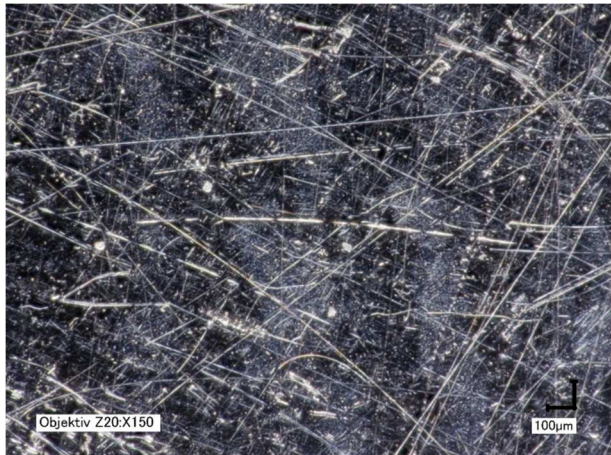
Probenbezeichnung	$R_{a,AFM}$ [μm]	F_{adh} [nN]	$\sigma(F_{adh})$ [nN]
E1	0,32	621	407
E2	0,06	$934 \cdot 10^4$	$140 \cdot 10^4$
E3	0,24	457	302
E4	0,37	591	371
Si1	0,12	227	$386 \cdot 10^4$
Si2	0,00	$819 \cdot 10^4$	$126 \cdot 10^3$
Si3	0,07	$482 \cdot 10^3$	$351 \cdot 10^3$

Anhang C: Mikroskopaufnahmen

Mikroskopaufnahmen der Feststoffproben



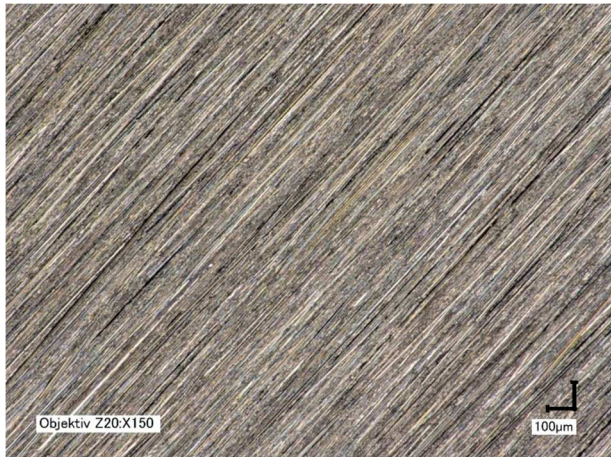
E1



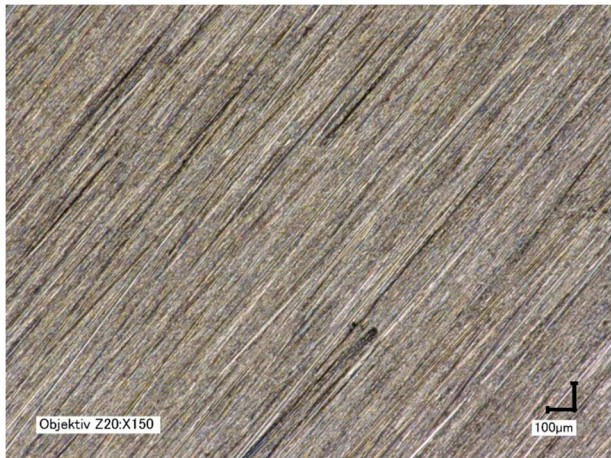
E2



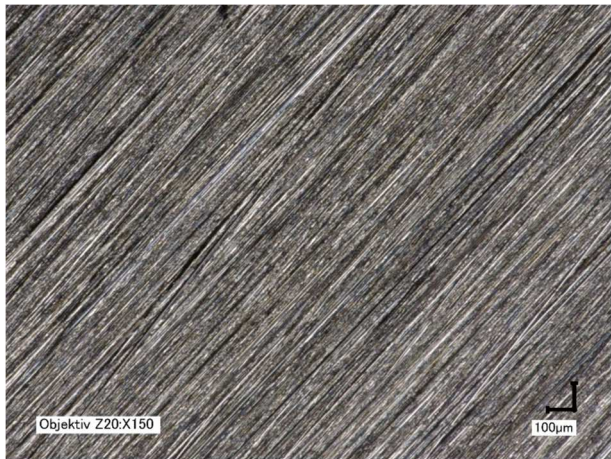
E3



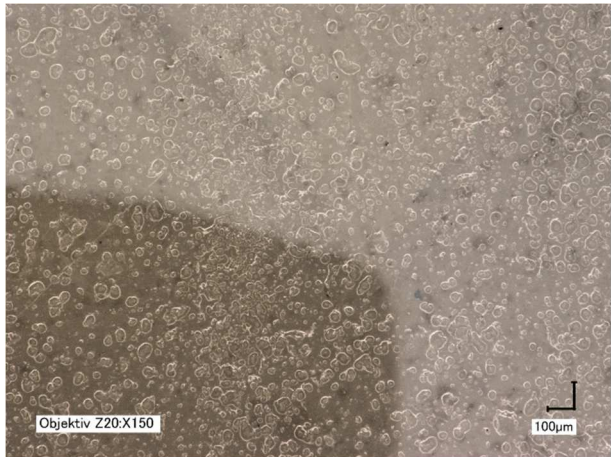
E4



E5



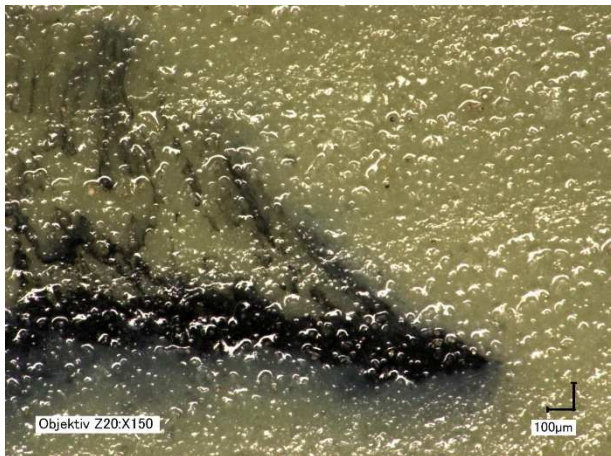
E6



P1



P2



P3



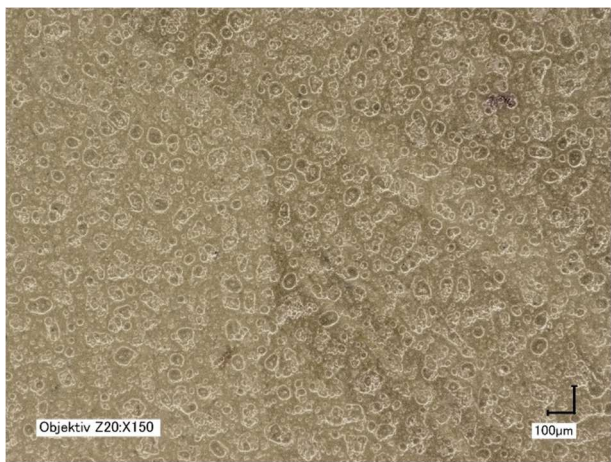
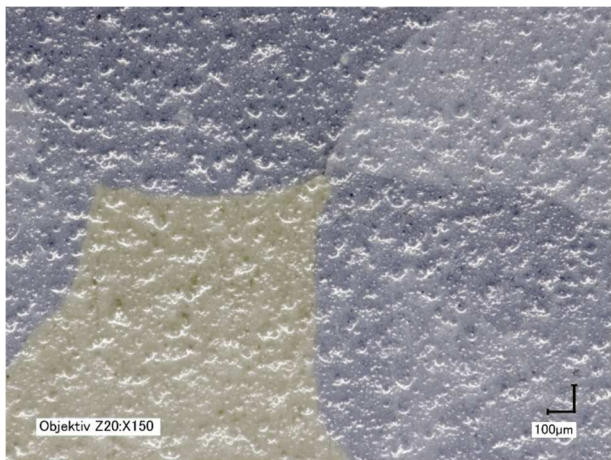
P4

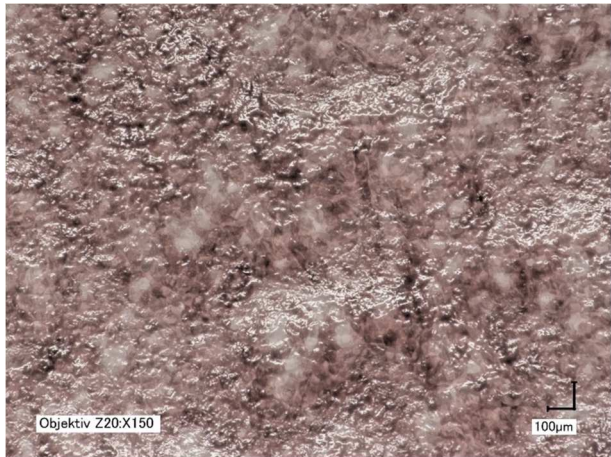


P5

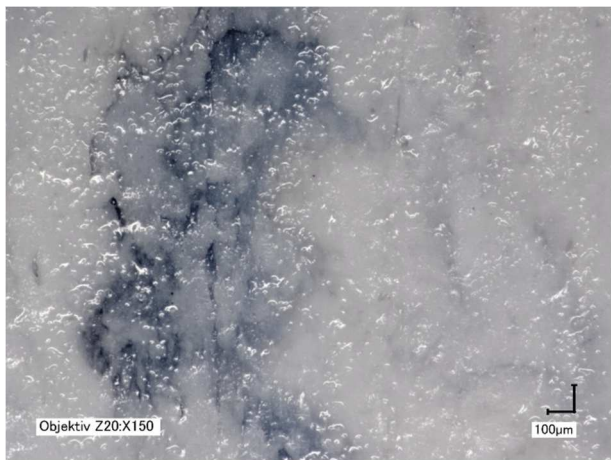


P6

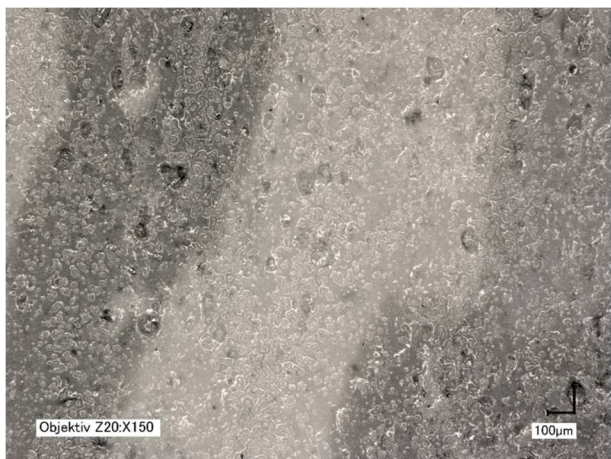




P10



P11



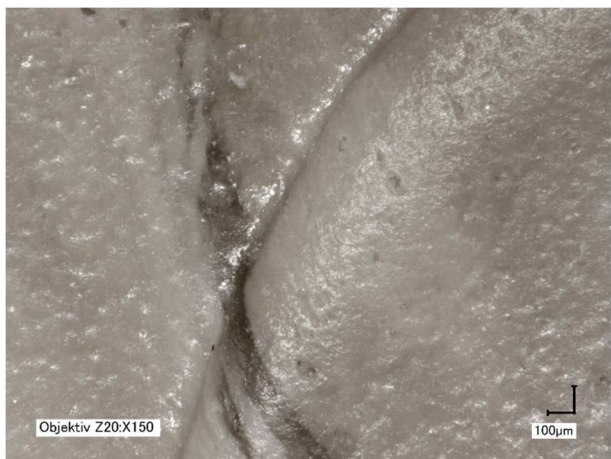
P12



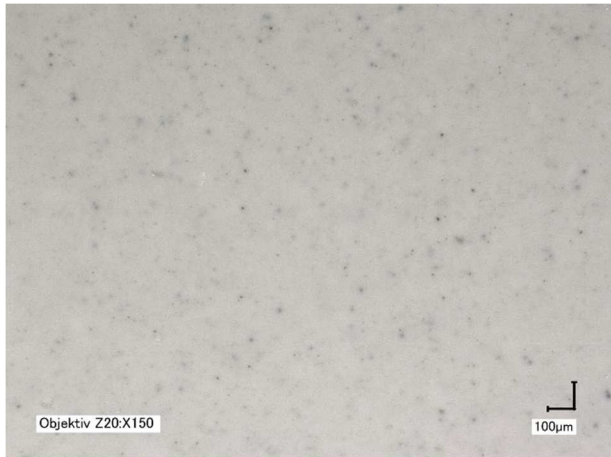
P13



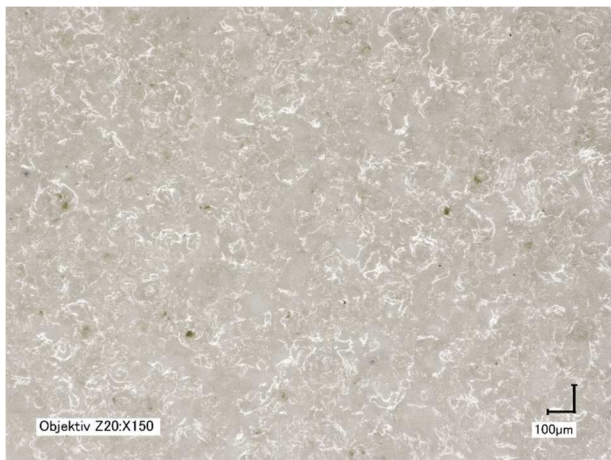
P14



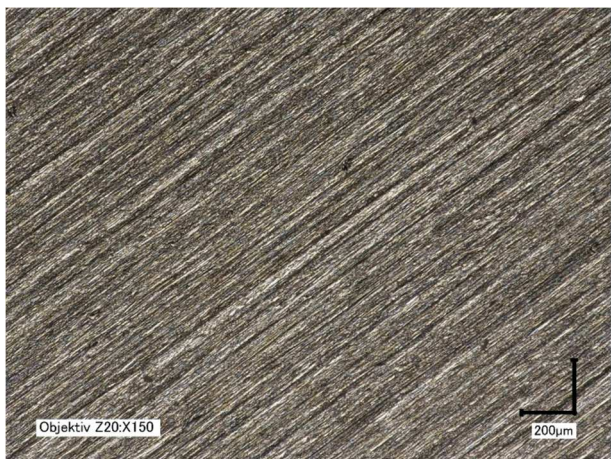
P15



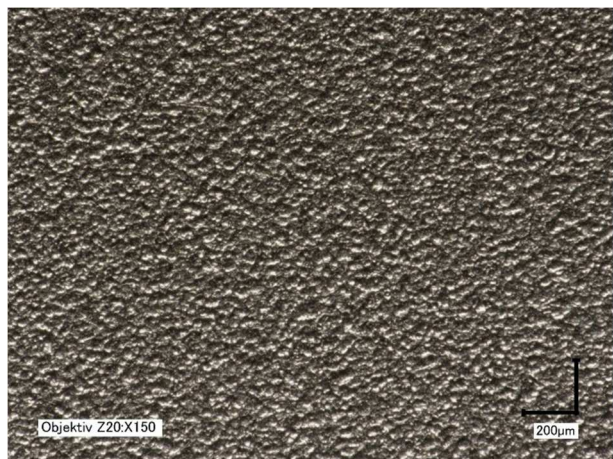
S1



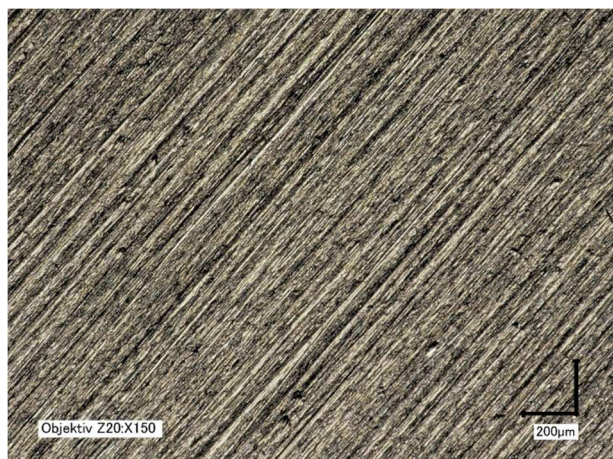
S2



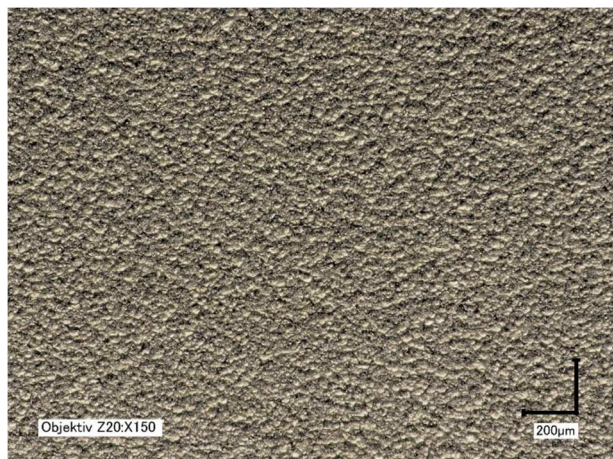
K1



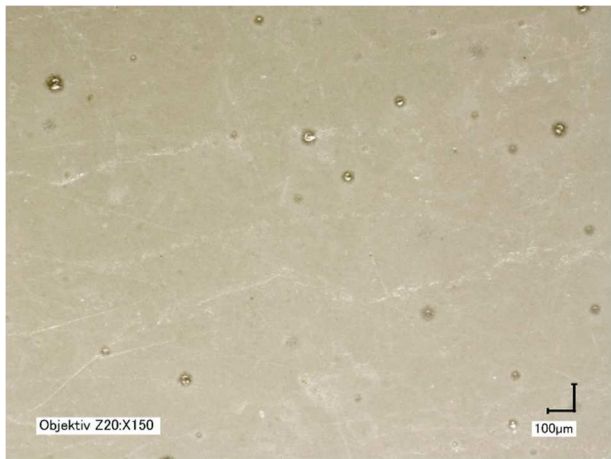
K2



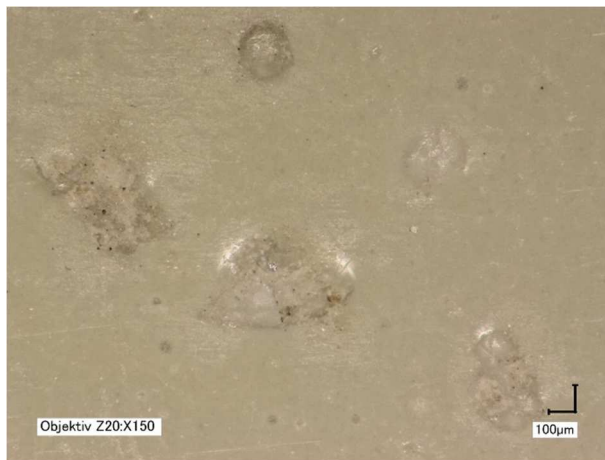
K3



K4



B1



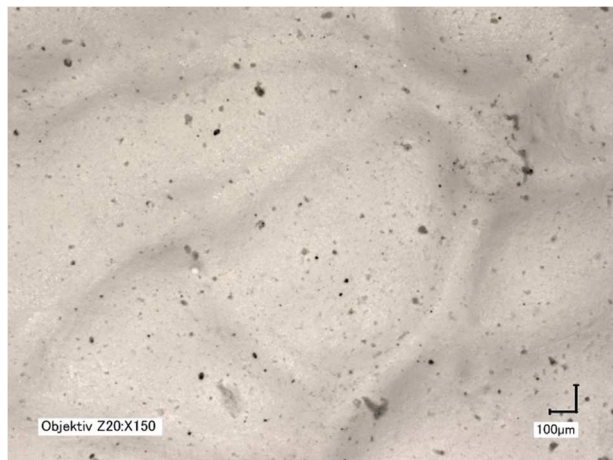
B2



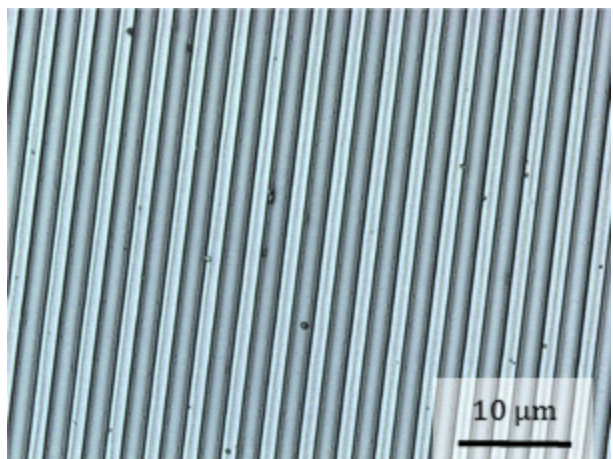
B3



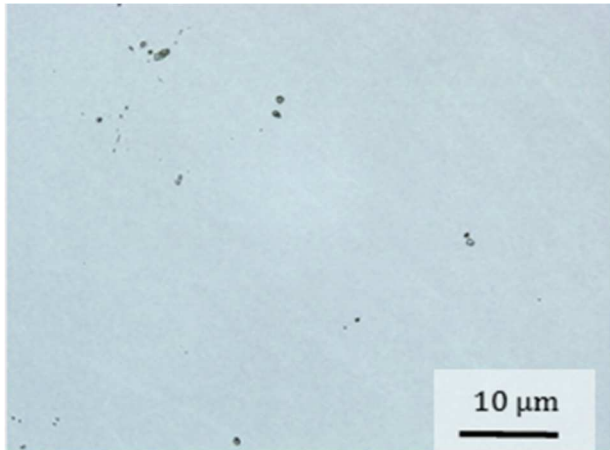
B4



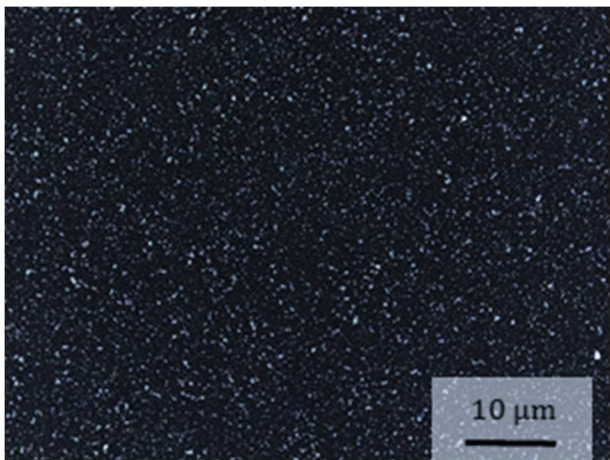
B5



Si1 (LSM)

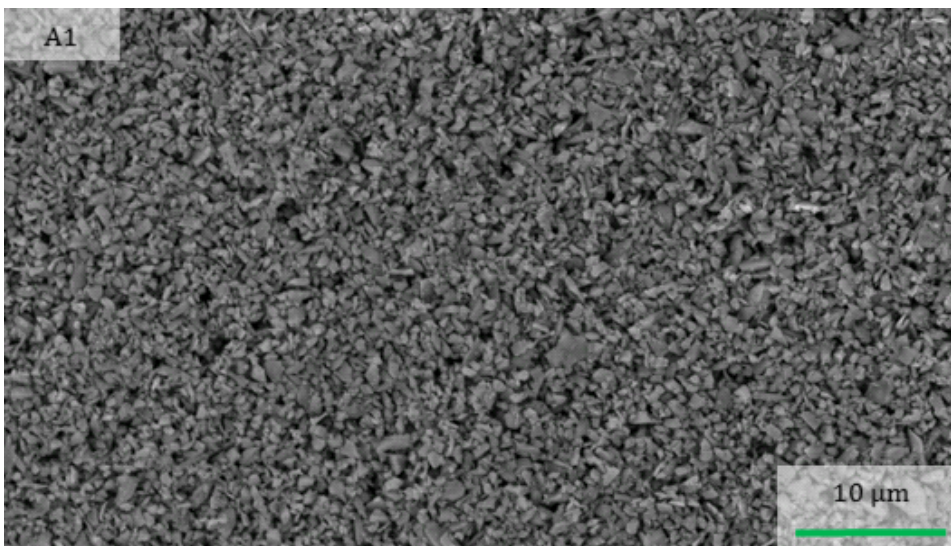


Si2 (LSM)

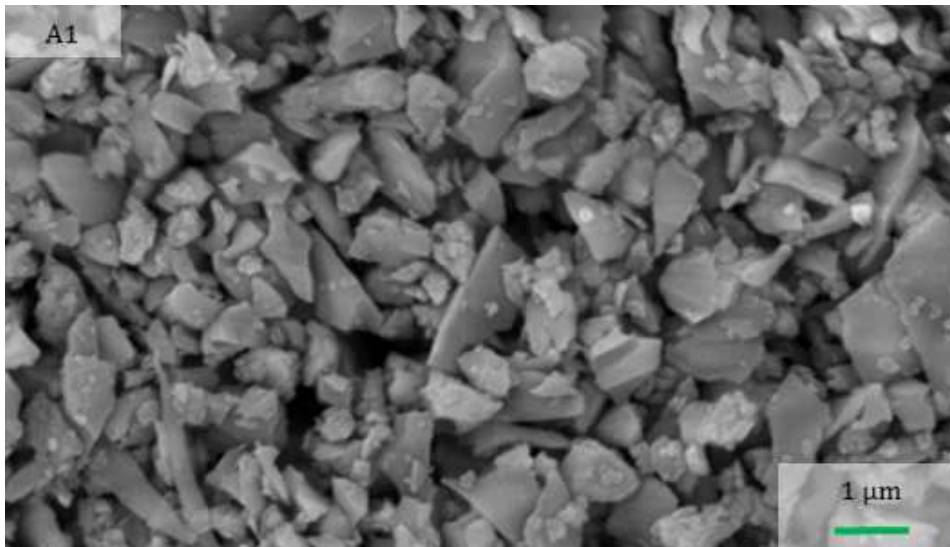


Si3 (LSM)

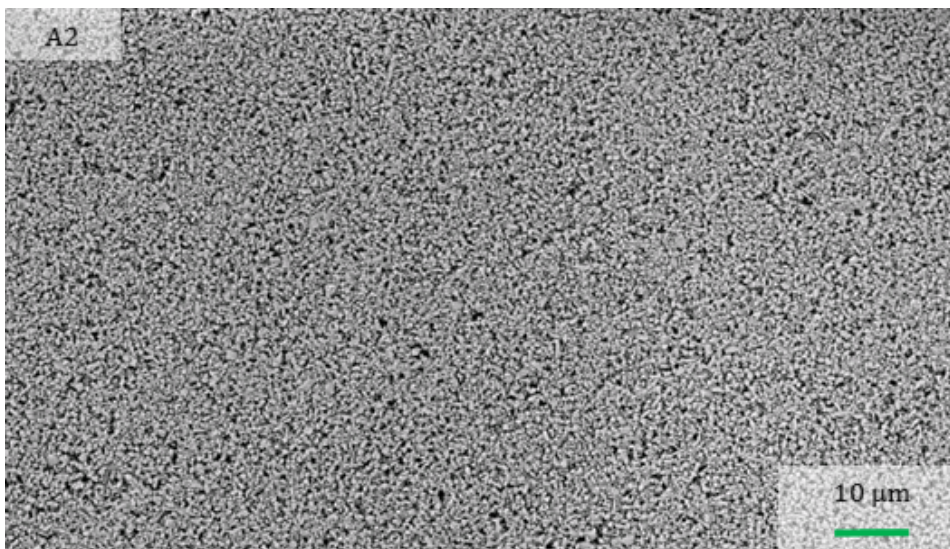
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der verwendeten Partikelsysteme



A1



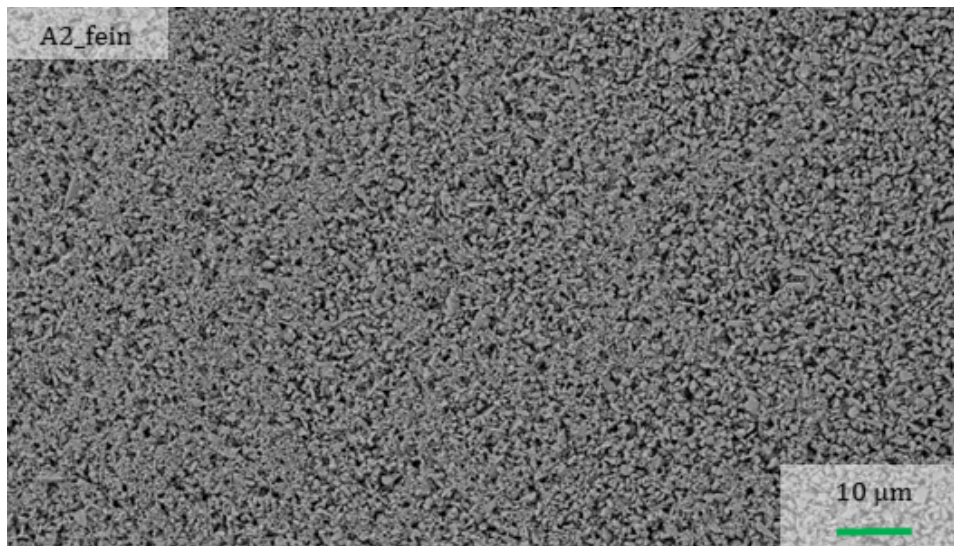
A1



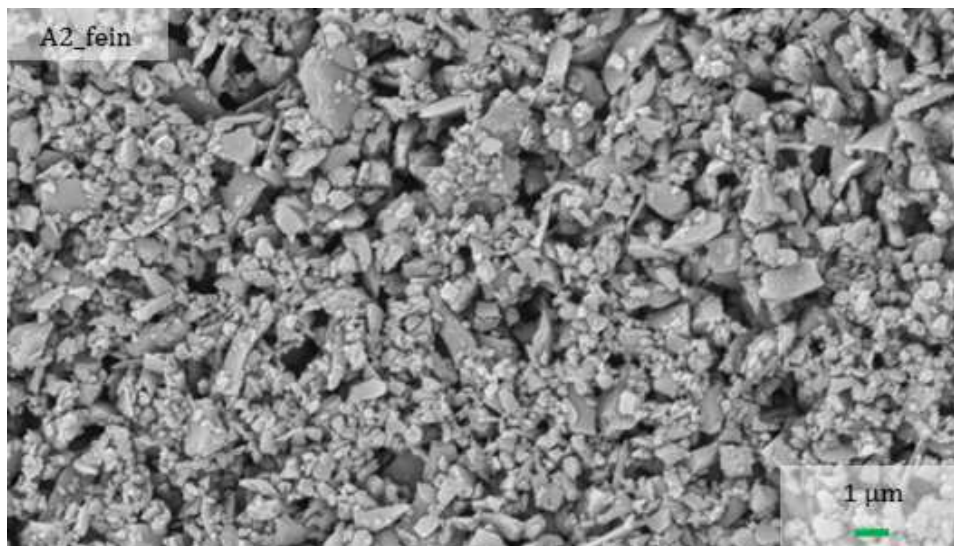
A2



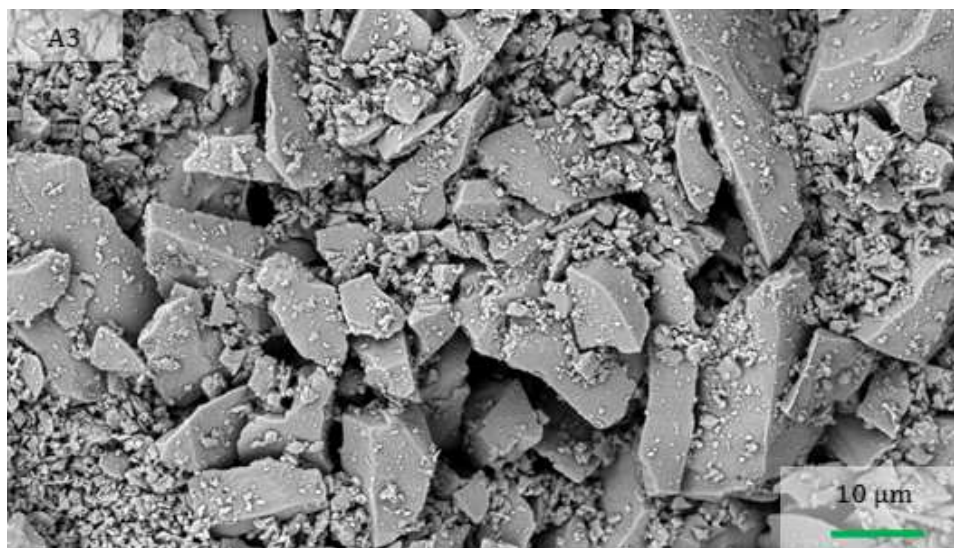
A2



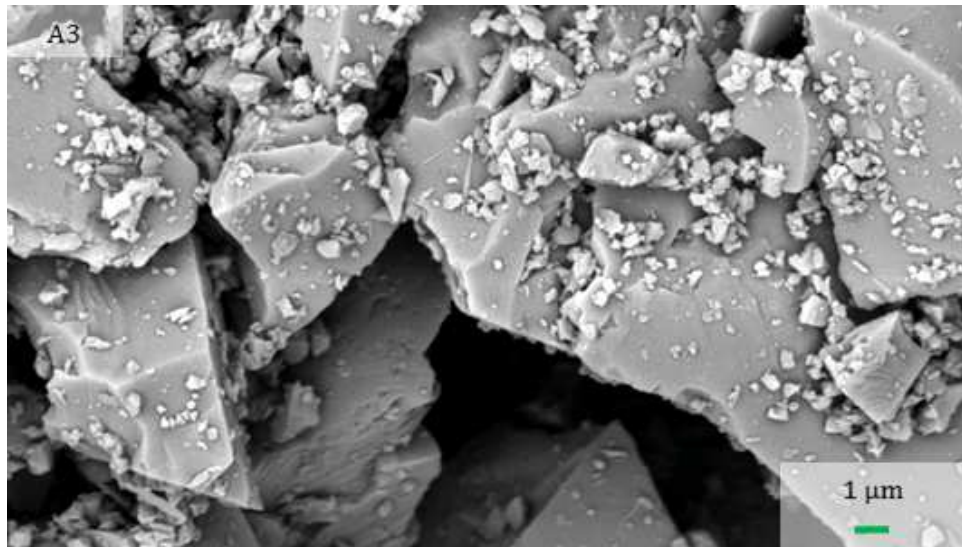
A2_fein



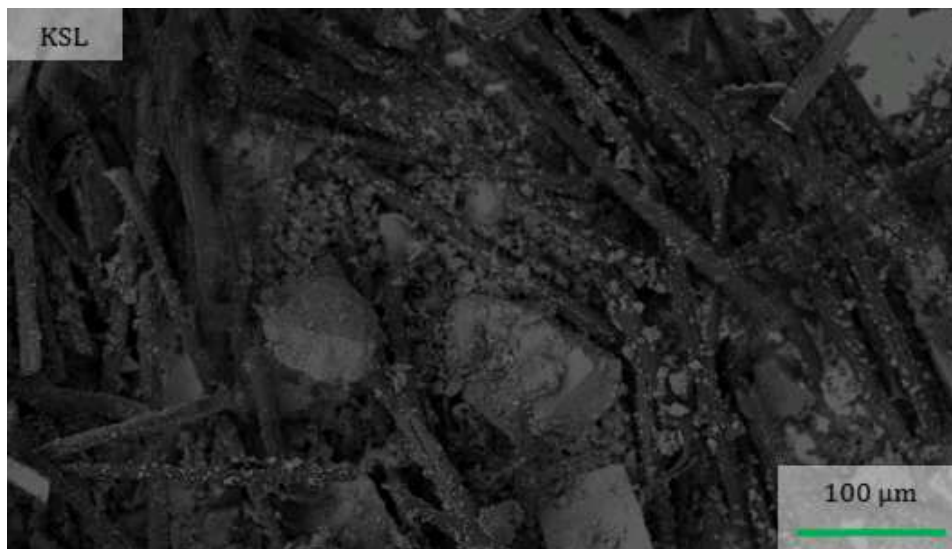
A2_fein



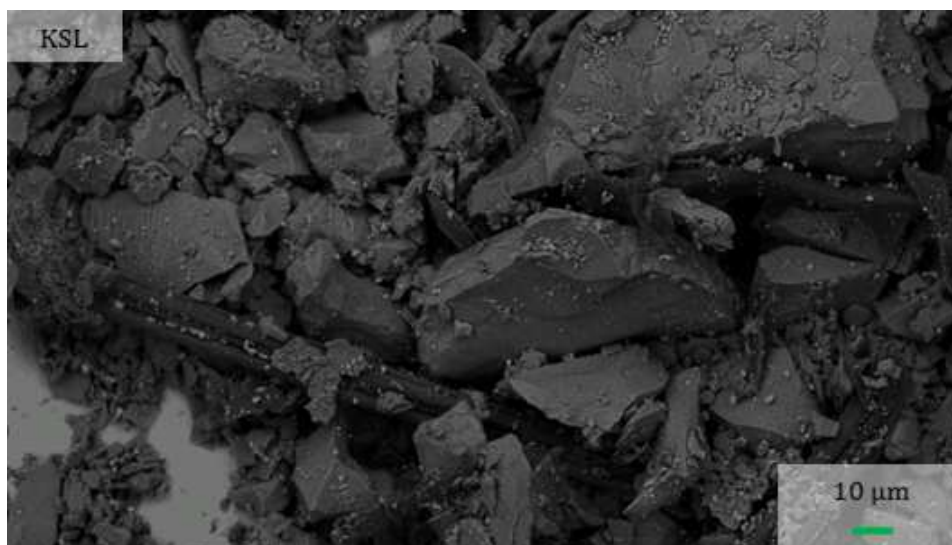
A3



A3



KSL



KSL

Anhang D: Reinigungsversuche

Berechnung adjustierter Antwortgraph

Die Berechnung der adjustierten Datenpunkte und die adjustierte Fit-Funktion sind die Grundlage der adjustierten Antwortgraphen. Bei J Faktoren im Modell kann die angepasste Zielgröße (y) als Funktion der Faktoren (x) ausgedrückt werden:

$$y_i = F(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}) \quad (A1)$$

Die adjustierte Fit-Funktion für den Faktor x_j ist definiert als:

$$f_j(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i,j-1}, x, x_{i,j+1}, \dots, x_{ij}) \quad (A2)$$

Der adjustierte Antwortgraph zeigt die adjustierte Fit-Funktion mit den adjustierten Datenpunkten:

$$y_{ij}^{adj} = f_j(x_{ij}) + e_i \quad (A3)$$

Hierbei ist e_i das Residuum der Beobachtung.

Verhaltensmodell Oberflächeneigenschaften

Messwerte¹

Tabelle: Messdaten zur Auswertung der Oberflächeneigenschaften. Kontamination: A1; Geschwindigkeit $v=100\%$; Konzentration $K=100\%$; 1 Hub; Auswertemethode: Partikelzähler

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5 μm	0,5<d≤1,0 μm	1,0<d≤3,0 μm	0,3<d≤0,5 μm	0,5<d≤1,0 μm	1,0<d≤3,0 μm
E1a	19883,1	2233,0	1191,2	34317,9	3341,4	1897,2
E1b	1239,8	48,2	29,5	75,8	16,1	25,9
E2	2206,7	688,8	639,3	1032,5	1087,2	1047,1
E3a	4268,3	4809,2	7890,0	6835,0	10915,6	17796,8
E3b	13823,0	943,2	346,6	32383,4	2174,5	648,6
E4a	1793,8	277,0	222,2	754,5	278,5	219,2
E4b	1225,1	61,8	32,9	114,2	12,9	14,3
E5a	3176,0	171,7	82,7	4403,3	201,8	95,4
E5b	1472,2	55,7	25,5	375,6	38,4	26,8
E6a	2631,9	128,8	72,9	2919,5	162,7	95,0
E6b	1403,0	50,5	21,3	84,6	24,6	18,5

¹ Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nicht alle einzelnen Messwerte, sondern lediglich Mittelwert und Standardabweichung dargestellt. Der Stichprobenumfang n , auf den die jeweiligen Angaben basieren, wird angegeben.

D: Reinigungsversuche

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5	0,5<d≤1,0	1,0<d≤3,0	0,3<d≤0,5	0,5<d≤1,0	1,0<d≤3,0
	µm	µm	µm	µm	µm	µm
P1	1486,1	111,3	73,3	84,9	41,4	60,0
P2	1707,2	184,3	113,6	208,3	128,7	92,1
P3	2662,1	893,6	678,5	1401,7	1212,1	852,0
P4	6382,2	369,4	92,2	1738,9	103,7	40,0
P5	6759,6	425,8	137,4	2525,5	193,0	89,3
P6	15629,2	1182,0	410,7	7766,0	553,9	235,4
P7	588380,6	47271,7	16572,6	32402,2	5150,1	4624,8
P8	1069,3	70,1	36,3	246,4	34,0	31,6
P9	657,2	53,3	40,0	35,4	43,0	42,4
P10	30602,6	2058,5	811,4	5004,8	413,8	202,8
P11	1143,9	72,1	42,0	364,0	35,5	45,3
P12	968,7	200,9	166,3	245,8	209,3	176,0
P13	3325,8	2289,6	2702,3	6831,3	5814,3	6853,7

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5	0,5<d≤1,0	1,0<d≤3,0	0,3<d≤0,5	0,5<d≤1,0	1,0<d≤3,0
	µm	µm	µm	µm	µm	µm
S1	843,7	63,6	42,3	365,6	81,9	64,0
S2	3118,1	286,9	181,2	1692,8	293,9	291,1

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5	0,5<d≤1,0	1,0<d≤3,0	0,3<d≤0,5	0,5<d≤1,0	1,0<d≤3,0
	µm	µm	µm	µm	µm	µm
B1	1707,0	67,8	26,1	126,1	16,1	19,9
B2	2087,1	81,0	38,2	527,8	47,0	57,0
B3	166792,0	11088,6	5295,2	76549,1	9007,1	6222,8
B4	270879,0	16218,6	5820,7	291782,5	18640,9	6953,1
B5	39413,3	35828,3	35831,0	29504,6	25236,7	22011,8

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5	0,5<d≤1,0	1,0<d≤3,0	0,3<d≤0,5	0,5<d≤1,0	1,0<d≤3,0
	µm	µm	µm	µm	µm	µm
K1a	13085,3	868,4	469,9	18907,2	1169,1	607,3
K1b	1789,6	146,2	112,7	282,7	156,3	124,4
K2	762229,0	36618,6	7543,8	101390,3	4834,4	1157,6
K3a	1436,6	46,4	17,4	684,8	28,3	27,7
K3b	1526,0	104,9	89,0	171,6	71,3	76,4
K4	413390,9	25327,8	6951,7	25978,8	2188,3	731,6

Tabelle: Messdaten auf Feststoffoberflächen nach der Reinigung. Kontamination: A2_{fein}; Geschwindigkeit v=100%; Konzentration K=100%; 1 Hub; Auswertemethode: Partikelzähler

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5 µm	0,5<d≤1,0 µm	1,0<d≤3,0 µm	0,3<d≤0,5 µm	0,5<d≤1,0 µm	1,0<d≤3,0 µm
E1a	4714,0	1160,0	536,5	5386,6	2702,9	1362,4
E1b	2573,0	219,0	65,7	976,8	92,1	39,3
E2	1946,4	120,6	25,7	1444,3	99,9	19,0
E3a	1642,7	530,1	271,4	990,3	694,3	381,2
E3b	1209,2	286,3	152,2	620,4	464,9	261,6
E4a	858,5	58,8	22,3	50,0	29,5	23,4
E5a	1736,2	620,4	374,4	1236,4	974,6	645,8
E5b	1080,7	102,2	46,7	119,6	68,4	44,5
E6a	859,9	47,9	14,3	74,7	13,5	9,5

Tabelle: Messdaten zur Auswertung der Oberflächeneigenschaften. Kontamination: A2; Geschwindigkeit v=100%; Konzentration K=100%; 1 Hub; Auswertemethode: Streiflichtmessgerät

Probe	I	S	Mittelwerte (n=6)			Standardabweichung		
			5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm	5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm
E1a	9	79	21,2	19,0	9,7	5,4	4,7	1,9
E1b	28	79	521,8	654,8	733,8	46,8	51,8	61,9
E2	101	80	599,1	674,6	948,3	426,0	477,0	713,3
E3a	30	80	528,8	575,5	586,3	81,0	88,7	134,4
E3b	5	91	526,5	568,8	742,2	339,9	399,2	587,7
E4a	30	79	782,7	812,2	1118,5	179,3	177,5	705,3
E4b	5	84	923,0	972,5	1347,8	72,9	88,0	210,9
E5a	41	80	261,2	293,7	280,8	119,3	146,1	167,5
E5b	39	80	302,8	304,0	270,8	65,5	77,0	72,4
E6a	42	79	326,8	373,8	369,2	162,2	184,0	184,8

Probe	I	S	Mittelwerte (n=6)			Standardabweichung		
			5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm	5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm
P1	3	85	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P2	21	80	332,0	441,1	984,3	51,7	78,8	142,0
P3	5	90	7,7	3,9	2,0	2,4	1,6	1,2
P4	3	86	0,7	0,5	0,5	1,1	0,8	0,5
P5	3	74	0,2	0,3	0,7	0,4	0,5	1,1
P6	5	97	0,5	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
P7	7	84	47,2	51,7	99,8	20,8	26,9	49,6
P8	5	78	4,8	6,0	10,8	1,8	1,2	5,9
P9	3	79	0,4	0,3	0,3	0,7	0,5	0,5
P10	3	71	1,6	0,4	0,0	1,4	0,5	0,0
P11	3	72	0,6	0,6	0,0	0,7	1,0	0,0
P12	3	86	0,5	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
P13	3	79	0,5	0,3	0,2	1,1	0,7	0,4

D: Reinigungsversuche

Probe	I	S	Mittelwerte (n=6)			Standardabweichung		
			5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm	5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm
K1a	5	75	16,8	15,8	13,7	6,4	9,5	6,5
K1b	5	76	17,7	18,3	14,3	14,4	17,5	11,1
K2	10	81	136,0	149,7	93,2	41,7	46,2	40,0
K3a	6	82	208,2	234,5	282,3	261,5	298,5	371,9
K3b	3	72	10,2	10,3	11,3	10,3	11,6	13,5
K4	7	79	65,2	70,8	43,3	6,6	9,7	10,4

Tabelle: Messdaten zur Auswertung der Oberflächeneigenschaften. Kontamination: A3; Geschwindigkeit v=100%; Konzentration K=100%; 1 Hub; Auswertemethode: Streiflichtmessgerät

Probe	I	S	Mittelwerte (n=6)			Standardabweichung		
			5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm	5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm
E1a	9	86	727,0	779,7	1786,8	170,1	207,8	444,7
E1b	13	81	806,5	812,0	1274,8	173,8	183,6	719,4
E2	76	80	426,5	528,2	771,8	270,9	349,8	659,0
E3a	7	78	686,0	703,7	1200,3	169,8	251,9	745,6
E3b	31	81	858,0	898,5	1387,2	285,0	254,9	763,3
E4a	39	79	1025,7	1048,0	2053,8	194,1	188,9	1140,2
E4b	29	80	888,3	913,0	1168,7	387,7	391,8	680,9
E5a	39	79	1004,8	998,5	1228,7	132,9	124,0	181,4
E5b	33	81	103,8	108,7	87,3	32,7	26,9	27,4
E6a	46	80	557,5	587,8	664,5	106,5	89,9	84,8
E6b	42	80	466,8	522,7	532,8	129,1	127,6	147,3

Probe	I	S	Mittelwerte (n=6)			Standardabweichung		
			5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm	5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm
P1	3	85	1,5	1,0	2,0	2,1	1,5	2,5
P2	15	78	242,7	289,7	514,2	62,0	58,8	133,7
P3	5	86	10,0	3,9	1,6	6,8	2,3	1,1
P4	3	84	3,0	2,5	1,5	1,5	1,0	1,5
P5	3	84	1,2	1,0	1,0	1,2	0,0	1,3
P6	3	65	0,7	0,2	1,2	0,9	0,4	1,2
P7	5	74	144,0	153,7	271,2	50,8	54,0	115,5
P8	5	79	6,7	4,6	5,4	3,7	2,5	3,0
P9	3	80	0,0	0,2	0,5	0,0	0,4	0,5
P10	3	71	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	1,1
P11	3	84	0,3	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
P12	3	86	0,5	0,7	0,5	0,8	0,7	1,1
P13	3	78	1,0	0,2	1,0	0,6	0,4	1,5

Probe	I	S	Mittelwerte (n=6)			Standardabweichung		
			5<d≤15	15<d≤25	25<d≤50	5<d≤15	15<d≤25	25<d≤50
			µm	µm	µm	µm	µm	µm
K1a	11	82	101,5	100,7	105,2	109,8	105,7	113,4
K1b	11	79	300,2	307,3	329,5	189,1	203,0	263,3
K2	9	79	90,0	93,5	55,7	31,5	41,1	26,5
K3a	15	78	130,8	89,7	86,3	171,3	105,7	102,2
K3b	9	82	248,7	265,5	303,7	173,1	176,4	233,8
K4	7	83	57,0	60,3	26,7	24,7	28,1	11,6

Tabelle: Messdaten zur Auswertung der Oberflächeneigenschaften. Kontamination: KSL; Geschwindigkeit v=100%; Konzentration K=100%; 1 Hub; Auswertemethode: Streiflichtmessgerät

Probe	I	S	Mittelwerte (n=6)			Standardabweichung		
			5<d≤15	15<d≤25	25<d≤50	5<d≤15	15<d≤25	25<d≤50
			µm	µm	µm	µm	µm	µm
E1a	31	81	251,0	235,3	2110,5	199,1	189,0	1716,4
E1b	5	81	989,0	1140,2	1430,2	95,2	120,5	169,1
E2	101	80	736,6	821,4	1272,7	177,0	217,9	409,4
E3a	32	81	663,0	753,8	1251,0	296,5	330,7	716,0
E3b	3	90	822,4	933,6	1100,8	79,2	76,4	99,7
E4a	45	82	285,8	300,2	346,2	85,7	87,1	112,9
E4b	27	80	891,3	1073,8	1289,8	68,1	56,0	100,5
E5a	34	80	251,7	289,0	255,7	33,5	40,8	49,5
E5b	13	84	213,5	231,2	209,7	97,6	100,9	93,9
E6a	45	80	808,0	881,7	1814,3	162,3	222,1	628,7
E6b	32	79	590,8	678,0	750,2	83,4	69,6	62,4

Probe	I	S	Mittelwerte (n=6)			Standardabweichung		
			5<d≤15	15<d≤25	25<d≤50	5<d≤15	15<d≤25	25<d≤50
			µm	µm	µm	µm	µm	µm
P1	3	93	0,5	0,3	0,3	0,5	0,7	0,5
P2	19	78	325,7	426,8	898,8	37,0	47,6	69,2
P3	5	91	7,0	7,3	5,3	6,8	8,8	7,2
P4	3	83	2,7	1,8	3,5	1,9	2,1	3,3
P5	3	79	0,8	0,2	0,3	0,7	0,4	0,5
P6	4	80	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,4
P7	7	87	91,8	90,0	191,3	46,5	40,9	95,5
P8	5	79	6,7	5,7	7,5	3,0	2,8	5,8
P9	3	79	0,2	0,2	0,7	0,4	0,4	1,5
P10	3	72	4,0	5,0	3,8	2,8	4,3	4,4
P11	3	76	4,0	4,3	4,3	5,3	5,6	5,1
P12	3	76	4,0	5,3	5,7	3,3	4,1	6,8
P13	3	95	7,8	7,5	8,2	8,5	8,5	7,2

D: Reinigungsversuche

Probe	I	S	Mittelwerte (n=6)			Standardabweichung		
			5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm	5<d≤15 µm	15<d≤25 µm	25<d≤50 µm
K1a	7	77	20,3	20,0	20,5	13,8	20,7	24,3
K1b	47	80	959,8	795,8	1312,3	111,9	112,9	263,0
K2	14	79	300,3	312,6	230,2	103,6	109,9	101,2
K3a	7	86	256,8	276,2	291,7	84,9	89,4	110,4
K3b	27	80	326,5	307,3	940,3	160,6	120,4	982,2
K4	9	80	133,8	138,3	108,3	91,9	98,4	93,0

Tabelle: Messdaten zur Auswertung der Wischhübe. Kontamination: A1; Geschwindigkeit v=100%; Konzentration K=100%; Wischhübe w variiert (1, 2, 3, 4, 5); Auswertemethode: Partikelzähler

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5 µm	0,5<d≤1,0 µm	1,0<d≤3,0 µm	0,3<d≤0,5 µm	0,5<d≤1,0 µm	1,0<d≤3,0 µm
P9; w=1	12762,1	13227,1	17796,0	26758,0	31358,2	39996,0
P9; w=2	1284,7	367,9	396,9	457,0	464,3	554,2
P9; w=3	869,2	371,6	466,7	508,4	558,7	775,1
P9; w=4	1397,8	269,4	361,8	255,1	350,1	537,3
P9; w=5	693,7	427,8	443,9	553,2	470,3	508,6

Tabelle: Messdaten zur Auswertung des Feuchteinflusses. Kontamination: A1; Geschwindigkeit v=100%; Konzentration K=100%; 1 Hub; Auswertemethode: Partikelzähler

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5 µm	0,5<d≤1,0 µm	1,0<d≤3,0 µm	0,3<d≤0,5 µm	0,5<d≤1,0 µm	1,0<d≤3,0 µm
E1b	2317,2	1479,0	1500,6	2395,7	2032,7	2105,0
E3b	1239,6	367,1	426,7	327,5	410,8	545,4
E4b	2732,8	1723,3	1784,4	3249,5	2789,3	2975,3
E5b	1689,2	922,0	1132,1	980,8	1116,3	1479,3
E6b	2567,9	1518,8	1839,1	2527,2	2378,8	3022,4

Tabelle: Messdaten zur Auswertung des Lappenwechsels. Kontamination: A1; Geschwindigkeit $v=100\%$; Konzentration $K=100\%$; 2 Wischhübe (+ kennzeichnet den Lappenwechsel); Auswertemethode: Partikelzähler

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5 µm	0,5<d≤1,0 µm	1,0<d≤3,0 µm	0,3<d≤0,5 µm	0,5<d≤1,0 µm	1,0<d≤3,0 µm
E1a	15661,1	2067,7	1596,8	7892,1	1278,9	1204,0
E1b	5017,6	424,7	282,9	3172,6	397,8	353,4
E2	2873,1	1536,4	2021,7	1660,2	1867,9	2547,9
E3a	1620,0	715,6	840,6	872,6	945,5	1156,2
E3b	1896,7	468,0	638,9	441,6	598,3	912,0
E4a	1231,2	416,7	529,2	482,5	542,7	744,2
E4b	2587,8	1093,6	1474,6	1093,9	1395,4	1992,0
E5a	1197,4	409,1	541,3	705,3	616,1	863,1
E5b	2458,9	323,0	350,3	1184,1	309,7	464,5
E6a	816,9	211,8	262,9	193,8	270,5	381,8
E6b	2532,6	666,6	852,7	613,9	861,9	1226,4
E1a+	1109,1	251,4	252,1	370,4	258,2	327,9
E1b+	2964,8	316,8	185,9	2857,7	257,1	186,2
E2+	1039,8	453,1	477,2	972,9	1050,7	1189,5
E3a+	887,2	185,6	191,7	155,3	201,4	266,8
E3b+	878,1	244,0	304,0	439,3	443,1	625,4
E4a+	951,6	160,3	145,6	100,1	167,2	214,5
E4b+	704,7	168,2	212,9	191,2	235,5	350,1
E5a+	1555,8	720,7	813,9	1134,3	1239,7	1479,8
E5b+	995,9	125,9	122,4	692,5	120,2	169,6
E6a+	1722,3	930,8	1089,0	1568,0	1625,9	2031,0
E6b+	629,2	180,2	212,8	171,7	243,2	311,7

Tabelle: Gemessene Partikelzahlen zur Auswertung der Oberflächeneigenschaften. Kontamination: A1; Geschwindigkeit $v=100\%$; Konzentration K variiert (33%, 66%, 100%); 1 Hub; Auswertemethode: Partikelzähler; *bei der Ermittlung dieser Werte wurde ein abweichender Druckluftstrom zum Ablösen der Partikel verwendet, eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Messwerte mit den restlichen Messungen ist nicht zwingend gegeben.*

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5 µm	0,5<d≤1,0 µm	1,0<d≤3,0 µm	0,3<d≤0,5 µm	0,5<d≤1,0 µm	1,0<d≤3,0 µm
P4; 100%	29807,9	29620,8	45996,0	26029,1	28557,5	42936,8
P4; 66%	5368,1	874,0	830,1	1926,5	871,8	1013,6
P4; 33%	1623,2	337,0	370,0	373,7	373,1	514,2
P7; 100%	136176,4	25945,1	23598,8	27742,7	8311,6	8944,9
P7; 66%	563146,2	41053,8	13436,9	55926,7	5450,8	5033,6
P7; 33%	206391,9	22452,7	11105,3	36578,0	7137,0	7360,5
P9; 100%	12762,1	13227,1	17796,0	26758,0	31358,2	39996,0
P9; 66%	2996,1	818,3	1027,6	806,4	781,2	1177,9
P9; 33%	795,9	281,7	350,4	437,5	479,7	665,0

Tabelle: Gemessene Partikelzahlen zur Auswertung der Oberflächeneigenschaften. Kontamination: A1; Geschwindigkeit variiert (33%, 66%, 100%); Konzentration K=100%; 1 Hub; Auswertemethode: Partikelzähler *bei der Ermittlung dieser Werte wurde ein abweichender Druckluftstrom zum Ablösen der Partikel verwendet, eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Messwerte mit den restlichen Messungen ist nicht zwingend gegeben.*

Probe	Mittelwerte (n=9)			Standardabweichung		
	0,3<d≤0,5	0,5<d≤1,0	1,0<d≤3,0	0,3<d≤0,5	0,5<d≤1,0	1,0<d≤3,0
	µm	µm	µm	µm	µm	µm
E1a; 100%	1109,1	251,4	252,1	370,4	258,2	327,9
E2; 100%	1039,8	453,1	477,2	972,9	1050,7	1189,5
E3a; 100%	887,2	185,6	191,7	155,3	201,4	266,8
E4a; 100%	951,6	160,3	145,6	100,1	167,2	214,5
E5a; 100%	1555,8	720,7	813,9	1134,3	1239,7	1479,8
E6a; 100%	1722,3	930,8	1089,0	1568,0	1625,9	2031,0
E1a; 66%	563,4	296,7	280,0	598,1	401,3	375,8
E1b; 66%	39201,8	2559,8	812,2	26261,7	1670,2	509,6
E2; 66%	1963,2	297,4	313,8	585,3	357,6	435,1
E3a; 66%	882,3	716,9	906,2	1381,8	1430,7	1891,4
E3b; 66%	3026,9	856,1	951,9	2202,1	1203,1	1409,9
E4a; 66%	1446,4	1150,1	1381,2	1808,9	1728,5	2186,0
E4b; 66%	2388,3	921,3	1063,8	1220,8	1229,9	1490,4
E5a; 66%	630,9	465,0	603,6	473,7	501,8	684,2
E5b; 66%	3285,7	667,1	714,9	1581,0	810,4	975,4
E6a; 66%	559,0	376,9	486,2	436,6	464,6	651,6
E6b; 66%	2031,8	428,7	501,6	1290,4	559,1	705,8
E1a; 33%	2676,3	254,7	167,6	2362,9	281,4	197,8
E1b; 33%	37939,8	2947,8	1089,3	47990,1	3284,3	1206,5
E2; 33%	3479,7	779,8	599,2	1743,8	1097,8	846,4
E3a; 33%	1246,1	318,3	325,8	579,4	432,7	515,6
E3b; 33%	2632,0	263,6	237,7	661,1	268,2	336,4
E4a; 33%	1094,7	411,0	516,1	493,5	530,6	696,8
E4b; 33%	2632,0	263,6	237,7	661,1	268,2	336,4
E5a; 33%	1413,1	212,2	174,4	834,4	206,2	220,7
E5b; 33%	1731,6	252,4	303,6	582,1	291,8	426,9
E6a; 33%	863,8	295,6	360,6	453,0	419,8	562,3
E6b; 33%	1222,2	177,3	217,7	152,0	205,2	314,8

Auswertung der Versuche mit dem Partikelzähler (0,3 µm < d ≤ 3,0 µm)

Innerhalb der Materialgruppen gilt:

$$\hat{P} = e^{R_a \cdot b_i} - k_0$$

mit $k_0 = 0,1$ bei Kupferlegierungen, sonst gilt $k_0 = 0$

Edelstahl ($0,3 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$)

Tabelle: Koeffizienten b und Signifikanzniveau α des Verhaltensmodells innerhalb der Proben-
gruppe der Edelstähle

Größenka- nal	$0,3 < d \leq 0,5 \mu\text{m}$		$0,5 < d \leq 1,0 \mu\text{m}$		$1,0 < d \leq 3,0 \mu\text{m}$	
	b	α	b	α	b	α
$R_a [\mu\text{m}]$	10,9150	0	7,3980	0	6,4865	0
R_{adj}^2		0,77		0,81		0,76

Kupferlegierung ($0,3 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$)

Tabelle: Koeffizienten b und Signifikanzniveau α des Verhaltensmodells innerhalb der Proben-
gruppe der Kupferlegierungen

Größenka- nal	$0,3 < d \leq 0,5 \mu\text{m}$		$0,5 < d \leq 1,0 \mu\text{m}$		$1,0 < d \leq 3,0 \mu\text{m}$	
	b	α	b	α	b	α
$R_a [\mu\text{m}]$	15,5489	0	11,1186	0	9,2747	0
R_{adj}^2		0,93		0,91		0,84

Betonbeschichtung ($0,3 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$)

Tabelle: Koeffizienten b und Signifikanzniveau α des Verhaltensmodells innerhalb der Proben-
gruppe der Betonbeschichtungen

Größenka- nal	$0,3 < d \leq 0,5 \mu\text{m}$		$0,5 < d \leq 1,0 \mu\text{m}$		$1,0 < d \leq 3,0 \mu\text{m}$	
	b	α	b	α	b	α
$R_a [\mu\text{m}]$	3,6999	0	3,0143	0	2,7774	0
R_{adj}^2		0,77		0,85		0,87

Gesamtmodell ($0,3 \mu\text{m} < d \leq 3,0 \mu\text{m}$)

$$\hat{P} = e^{b_i \cdot R_a + b_j \cdot \gamma_S + b_{ij} \cdot R_a \cdot \gamma_S} - k_0$$

mit $k_0=0,1$

Größenka- nal	$0,3 < d \leq 0,5 \mu\text{m}$		$0,5 < d \leq 1,0 \mu\text{m}$		$1,0 < d \leq 3,0 \mu\text{m}$	
	b	α	b	α	b	α
$R_a [\mu\text{m}]$	5,0120	0	2,5161	$3 \cdot 10^{-5}$	1,4622	0,02
$\gamma_S [\text{mN/m}]$	0,2300	0	0,1390	0	0,1123	0
$R_a \gamma_S [\text{nN}]$	-0,1291	$2 \cdot 10^{-11}$	-0,044	0,02	-0,0111	0,58
R_{adj}^2		0,94		0,89		0,84

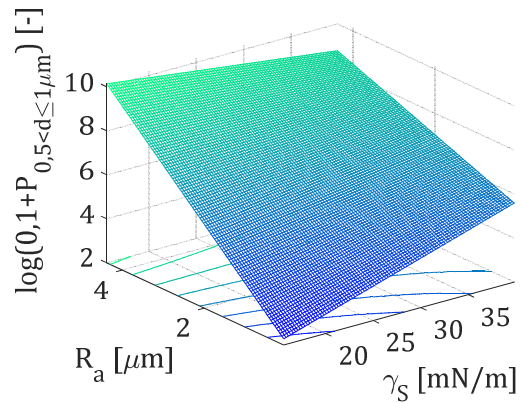
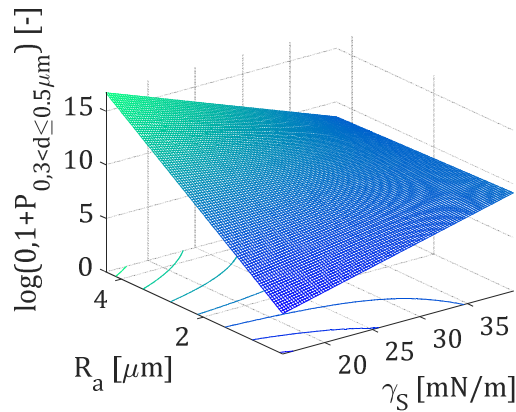


Abbildung: Verhaltensmodell des Größenkanals $0,3 < d \leq 0,5 \mu\text{m}$ & $0,5 < d \leq 1,0 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A1 ($n=307$)

Auswertung der Versuche mit dem Streiflichtmessgerät ($5 \mu\text{m} < d \leq 50 \mu\text{m}$)

Kontamination A2

Gesamtmodell ($5 \mu\text{m} < d \leq 50 \mu\text{m}$)

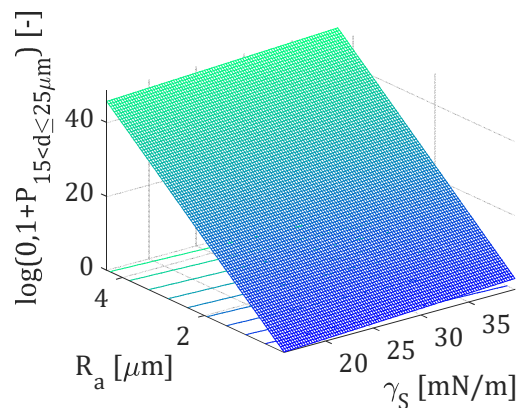
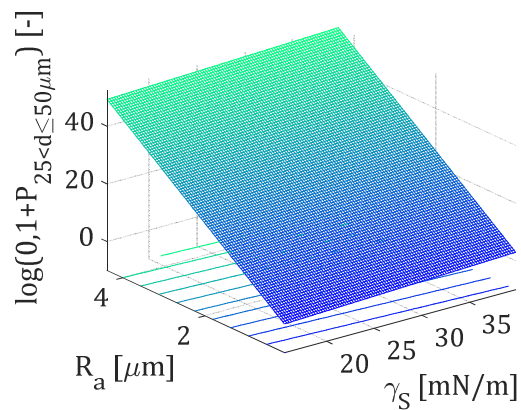
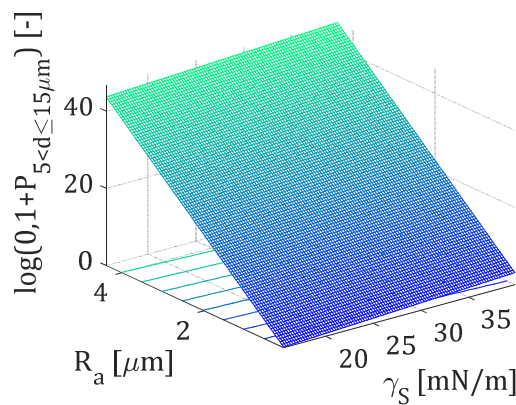


Abbildung: Verhaltensmodell des Größenkanals $5 < d \leq 15 \mu\text{m}$, $15 < d \leq 25 \mu\text{m}$ & $25 < d \leq 50 \mu\text{m}$ bei der Kontamination A2 (Beleuchtungsintensität=45, $n=175$)

Größenka- nal	5 < d ≤ 15 μm		15 < d ≤ 25 μm		25 < d ≤ 50 μm	
	b	α	b	α	b	α
R _a [μm]	-2,10	0	-2,53	0	-2,74	0
γ _S [mN/m]	0,12	0	0,12	0	0,12	0
I	-0,05	1·10 ⁻³	-0,05	1·10 ⁻³	-0,06	3·10 ⁻⁴
R _a I [nN]	0,28	0	0,29	0	0,31	0
R _{adj} ²	0,72		0,72		0,73	

Kontamination A3

Gesamtmodell (5 μm < d ≤ 50 μm)

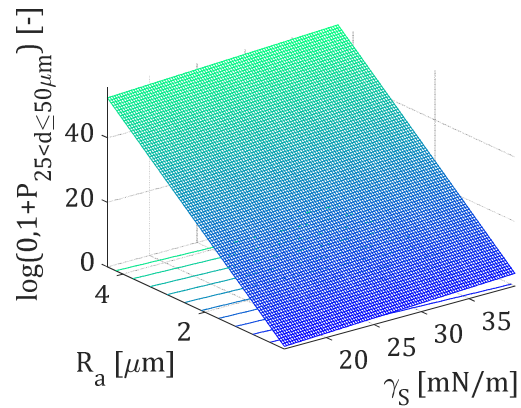
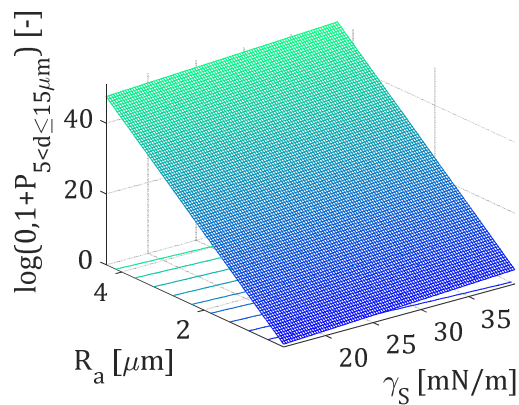


Abbildung: Verhaltensmodell des Größenkanals 5 < d ≤ 15 μm & 25 < d ≤ 50 μm bei der Kontamination A3 (Beleuchtungsintensität=45, n=182)

Größenka- nal	5 < d ≤ 15 μm		15 < d ≤ 25 μm		25 < d ≤ 50 μm	
	b	α	b	α	b	α
R _a [μm]	-2,20	1·10 ⁻¹³	-2,17	2·10 ⁻¹²	-2,38	2·10 ⁻¹³
γ _S [mN/m]	0,13	0	0,12	2·10 ⁻¹³	0,13	3·10 ⁻¹³
I	-0,04	0,05	-0,03	0,15	-0,04	0,06
R _a I [nN]	0,29	4·10 ⁻¹²	0,29	5·10 ⁻¹¹	0,32	3·10 ⁻¹²
R _{adj} ²	0,76		0,74		0,74	

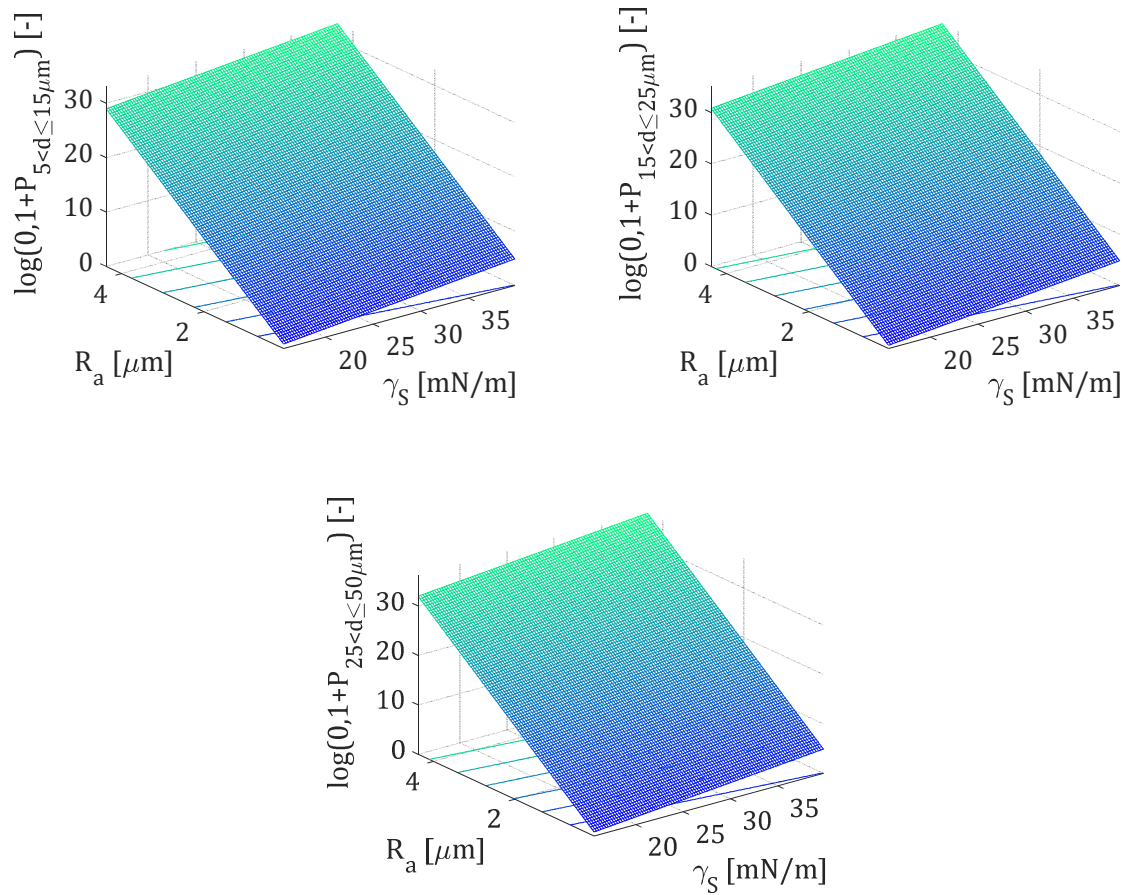
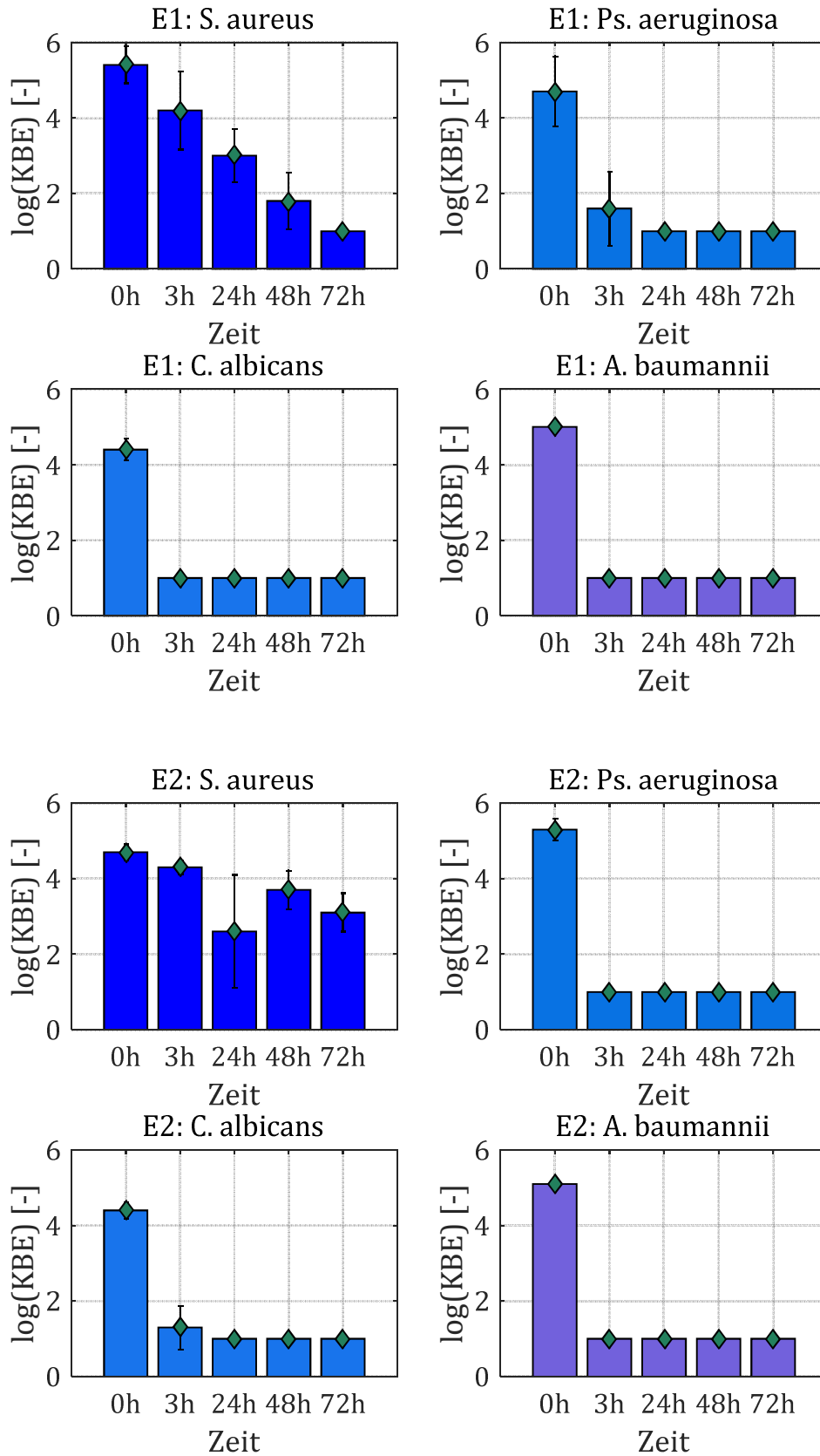
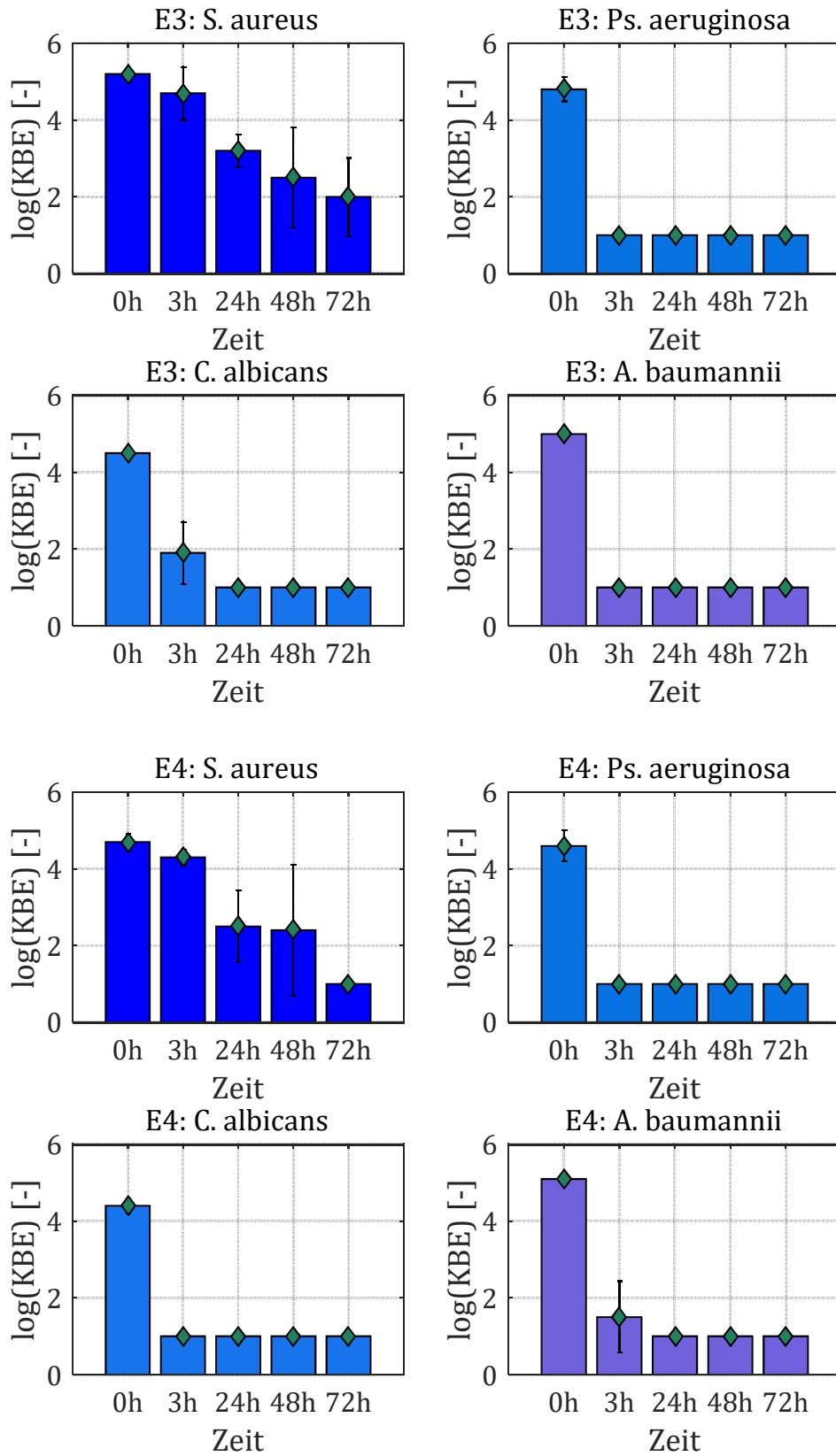
Kontamination KSL**Gesamtmodell ($5 \mu\text{m} < d \leq 50 \mu\text{m}$)**

Abbildung: Verhaltensmodell des Größenkanals $5 < d \leq 15 \mu\text{m}$, $15 < d \leq 25 \mu\text{m}$ & $25 < d \leq 50 \mu\text{m}$ bei der Kontamination KSL (Beleuchtungsintensität=45, $n=193$)

Größenkanal	$5 < d \leq 15 \mu\text{m}$		$15 < d \leq 25 \mu\text{m}$		$25 < d \leq 50 \mu\text{m}$	
	b	α	b	α	b	α
$R_a [\mu\text{m}]$	-2,26	0	-2,47	0	-2,42	0
$\gamma_s [\text{mN/m}]$	0,17	0	0,17	0	0,17	0
I	-0,05	$3 \cdot 10^{-3}$	-0,05	$7 \cdot 10^{-4}$	-0,05	$3 \cdot 10^{-3}$
$R_a I [\text{nN}]$	0,19	0	0,21	0	0,21	$2 \cdot 10^{-14}$
R_{adj}^2	0,80		0,81		0,79	

Anhang E: Ergebnisse der Persistenzuntersuchung





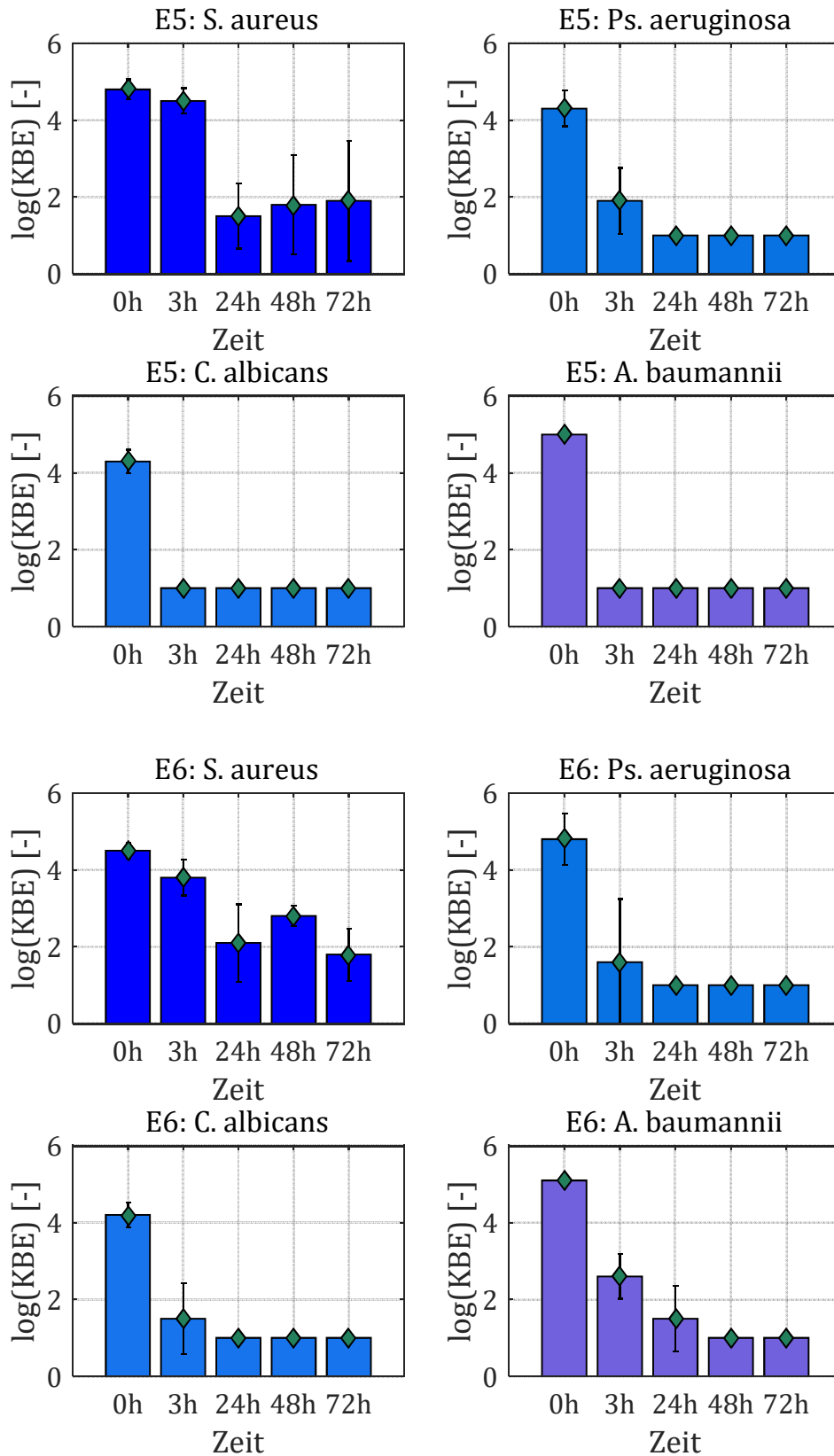
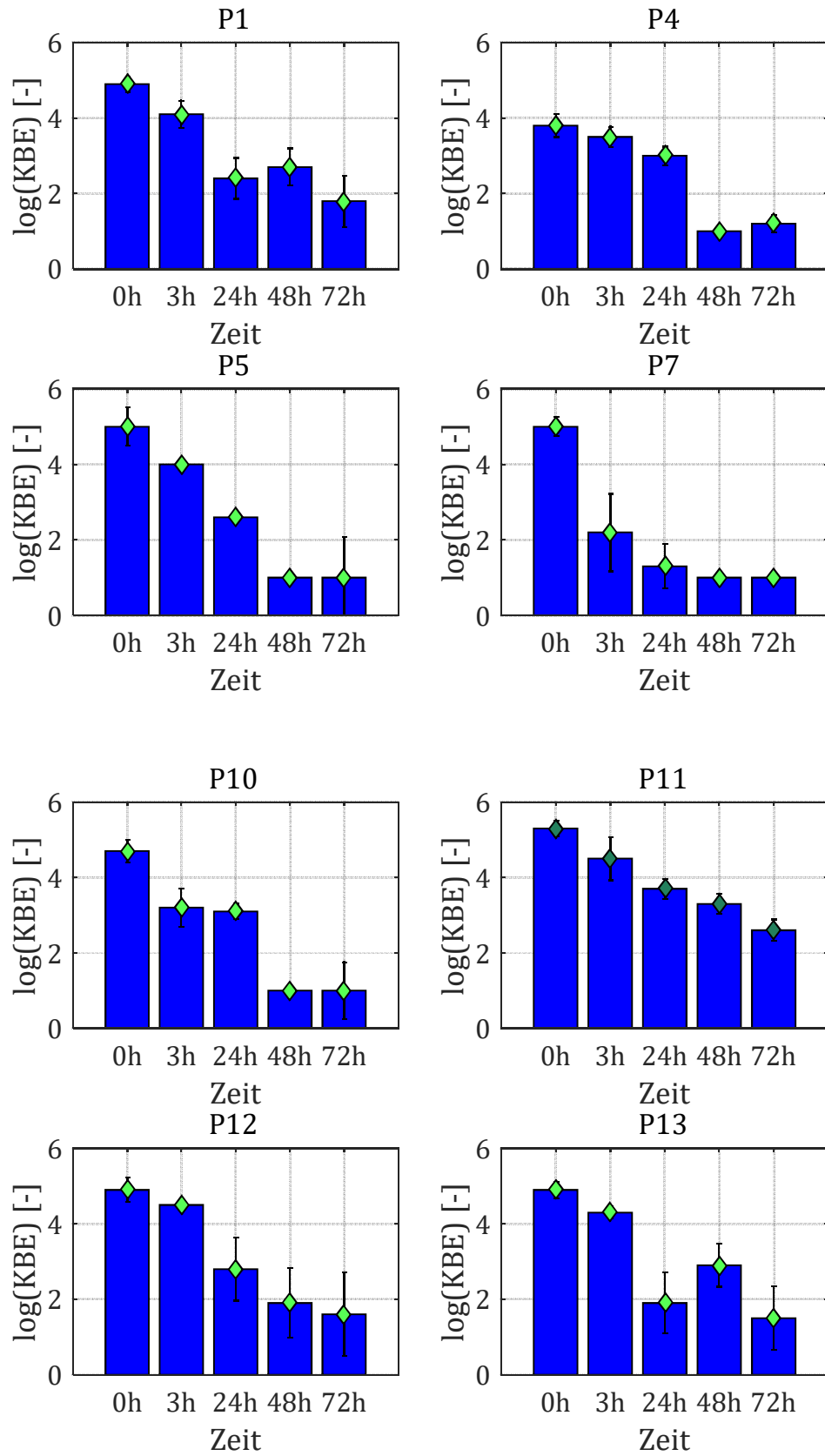


Abbildung: Logarithmierte Zellzahl KBE von *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans* und *Acinetobakter baumannii* zur Inkubationszeit t auf den untersuchten Edelstahlproben



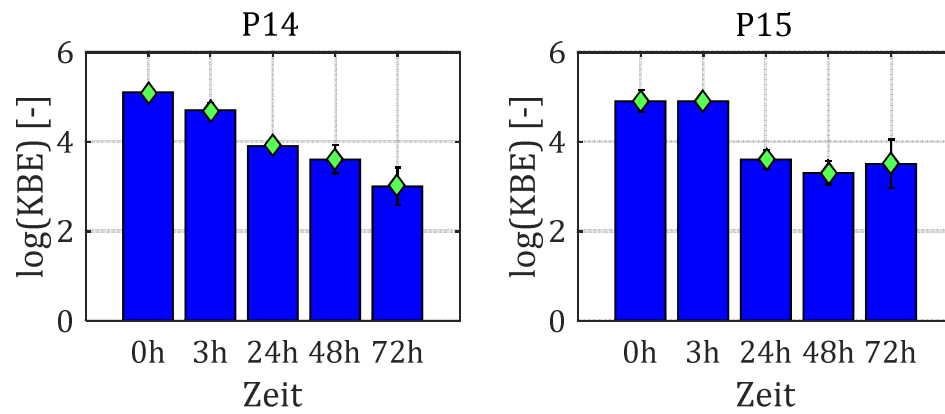


Abbildung: Logarithmierte Zellzahl KBE von *Staphylococcus aureus* zur Inkubationszeit t auf den untersuchten Polymerproben